

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Desenho Acústico de um Espaço**

**Raquel Sofia de Vasconcelos Ribeiro**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Diamantino Rui da Silva Freitas

21 de Julho de 2017



# Resumo

A acústica de espaços cuja finalidade é a comunicação acústica através da palavra, nomeadamente as salas de aula, é um tema ao qual não tem sido dada a devida importância em alguns projetos de arquitetura, com consequências na existência de condições acústicas adversas, o que afeta diariamente a aprendizagem dos estudantes e o bem estar dos professores. Este problema surge da falta de consciencialização na fase do projeto do espaço sobre as especificações acústicas necessárias para a finalidade do mesmo. É conhecido na ciência acústica, que se este for utilizado para comunicação por meio da palavra, então a inteligibilidade da transmissão da mesma só será assegurada por meio de uma atenção deliberada, devendo portanto ser um fator a ter em consideração.

Este é, contudo, um problema bem conhecido e constatado em vários estudos de engenharia e em medições previamente efectuadas em espaços letivos. Foi também através do contacto direto com o mesmo problema e da percepção do seu impacto que se tornou motivador selecioná-lo como o tema a tratar nesta dissertação. No decurso de anteriores estudos realizados em espaços deste tipo da FEUP e noutros espaços similares da mesma instituição, alcançou-se uma fase de diagnóstico claro do problema e realizaram-se mesmo algumas intervenções pontuais com resultados em alguns casos interessantes. No entanto, no caso bem sucedido, verificou-se que as alterações realizadas na sala foram bastante grandes e dispendiosas, dificultando a sua generalização a toda a faculdade.

Assim, surge a necessidade do desenvolvimento deste estudo onde se pretende analisar para intervir. Escolheu-se um espaço de aulas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, mais precisamente o anfiteatro B013, com um critério de generalidade, no qual se pretende avaliar as condições acústicas existentes e comparar com as que se sabe serem necessárias para efeito da comunicação acústica.

Para tal foram feitas várias medições no espaço para concluir se este apresenta parâmetros acústicos dentro da gama adequada. Foram medidos o tempo de reverberação ( $T_r$ ), o *rapid speech transmission index* (RASTI), e outros parâmetros acústicos, com recurso a instrumentação acústica e ao *software* Matlab.

Foi ainda desenvolvido um modelo acústico do anfiteatro no *software* EASE, no qual é possível obter resultados simulados para os parâmetros medidos anteriormente, comparar os mesmos e introduzir alterações no modelo para perceber o seu impacto no espaço real.

Finalmente, são apresentadas possíveis soluções no domínio acústico e também recorrendo a reforço sonoro eletroacústico para corrigir o funcionamento do espaço em análise, tendo como finalidade proporcionar um melhor conforto acústico e eficácia comunicacional para as pessoas que o utilizam.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica, Anfiteatro, Sala de aula, Inteligibilidade da palavra, Tempo de reverberação, Eletroacústica, Reforço sonoro.





# Abstract

The acoustics of spaces whose purpose is speech communication, namely classrooms, is a subject that has not been given due importance in some architectural projects, with consequences in the existence of adverse acoustic conditions, which affects the students daily learning and the well-being of teachers. This problem arises from the lack of awareness in the space's project stage about the acoustic specifications necessary for the purpose of the same. It is known in the acoustic science that, if the space is used for speech communication, then the intelligibility of the transmission will only be assured by deliberate attention and should therefore be a factor to be taken into account.

This is, anyhow, a well-known problem, found in several engineering studies and in measurements previously made in lecture spaces. It was also through direct contact with the problem and the perception of its impact that it became necessary select it and make it the topic to be treated in this dissertation. In the course of previous studies in this and similar spaces of FEUP, a clear diagnosis of the problem was achieved and some interventions were carried out with interesting results in some cases. However, in the successful case, it was found that the changes made in the room were quite large and expensive, making it difficult to generalize to all the faculty.

Thus, the need arises to develop this study in which one intends to analyze to intervene. A lecture room of the Faculty of Engineering of the University of Porto was chosen, more precisely amphitheater B013, with a criterion of generality, in which it is intended to evaluate the existing acoustic conditions and to compare with those that are known to be necessary for the acoustic communication effect.

For this purpose, several measurements were made in the space to conclude whether the acoustic parameters are within the appropriate range. Reverberation time (RT), rapid speech transmission index (RASTI), and other acoustic parameters were measured and analyzed using acoustical instrumentation and the Matlab software.

An acoustic model of the amphitheater was also developed in the EASE software, in which it is possible to obtain simulated results for the previously measured parameters, to compare them and to introduce changes in the model to perceive their impact in the real space.

Finally, possible solutions are presented in the acoustic domain and also using electroacoustic sound reinforcement to correct the functioning of the space under analysis, aiming to provide a better acoustic comfort and communicational effectiveness for the people who use it.

**KEYWORDS:** Acoustics, Amphitheater, Classroom, Speech intelligibility, Reverberation time, Eletroacoustics, Sound reinforcement.



# Agradecimentos

Não podia começar esta secção de agradecimentos sem demonstrar o meu apreço à pessoa que tornou este trabalho possível e que incutiu em mim o gosto pela acústica. Deixo assim o meu agradecimento ao Prof. Doutor Diamantino Freitas pela sua dedicação e apoio ao longo destes meses e, por fazer com que o desenvolvimento desta dissertação resultasse num grande percurso de aprendizagem.

Ao Eng.º António Costa por toda a paciência e auxílio nas medições efetuadas que possibilitaram a realização deste estudo.

Ao Sr. Aníbal pela sua atenciosidade e disponibilidade na montagem de material necessário para a realização de testes na câmara reverberante. A sua minuciosidade na construção do mesmo permitiu a simulação do impacto do material estudado da forma mais realista possível.

Ao Eng.º João Moutinho pela sua disponibilidade e ajuda no processo de aprendizagem de utilização do *software* Ease.

Ao Eng.º António Vasconcelos por disponibilizar informações sobre o anfiteatro em análise.

A todos os meus amigos que me acompanharam e apoiaram ao longo deste período.

À Tunafe por todas as experiências, lições e amizades construídas ao longo de 5 anos.

Agradeço ainda a toda a gente que se disponibilizou para participar nos testes realizados na câmara reverberante, nomeadamente, à Catarina Cruz, Rita Moreira e Mariana Santos.

E por fim, à minha família que me apoiou nos bons e maus momentos do percurso académico e me ajudou a alcançar os meus objetivos.

Raquel Ribeiro



*“Para ser grande, sê inteiro: nada  
Teu exagera ou exclui.  
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.  
Assim em cada lago a lua toda  
Brilha, porque alta vive. ””*

Ricardo Reis, "Odes"



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento . . . . .	1
1.2	Motivação . . . . .	1
1.3	Objetivos . . . . .	2
1.4	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1	Fenómenos Acústicos . . . . .	4
2.1.1	Divergência Sonora da Fonte . . . . .	4
2.1.2	Reflexões Sonoras . . . . .	5
2.1.3	Refração Sonora . . . . .	6
2.1.4	Difração do Som . . . . .	7
2.1.5	Difusão do Som . . . . .	7
2.1.6	Absorção Sonora . . . . .	8
2.1.7	Ressonâncias da Sala . . . . .	8
2.1.8	Ressonâncias de Cavidades . . . . .	9
2.2	Comunicação Acústica e Fatores Humanos Psicoacústicos . . . . .	9
2.3	Campo Direto e Campo Reverberado . . . . .	13
2.4	Parâmetros Acústicos Objetivos . . . . .	14
2.4.1	Tempo de Reverberação . . . . .	14
2.4.2	Claridade ( $C_{50}$ ) . . . . .	15
2.4.3	Definição ( $D_{50}$ ) . . . . .	15
2.5	Inteligibilidade da Palavra . . . . .	16
2.6	Eletroacústica . . . . .	17
2.6.1	Diretividade e Intensidade . . . . .	18
2.6.2	Projeto de Sistemas Eletroacústicos . . . . .	20
2.7	Tecnologias e Ferramentas para o Desenho Acústico . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Metodologia de Estudo, Avaliação e Desenho Acústico de Espaços de Aula</b>	<b>27</b>
3.1	Legislação e Valores Recomendados . . . . .	27
3.2	Avaliação do Espaço por Simulação e Experimentação . . . . .	28
3.3	Soluções e Confirmação Experimental . . . . .	29
3.4	Metodologias Propostas . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Caso de Estudo: Anfiteatro B013 (FEUP)</b>	<b>31</b>
4.1	Avaliação Acústica . . . . .	32
4.1.1	Instrumentação . . . . .	32
4.1.2	Tempo de Reverberação . . . . .	35

## CONTEÚDO

4.1.3	RASTI . . . . .	39
4.1.4	Definição ( $D_{50}$ ) e Claridade ( $C_{50}$ ) . . . . .	40
4.1.5	Ruído de Fundo . . . . .	42
4.1.6	Resposta Impulsional e ETC do Anfiteatro . . . . .	43
4.1.7	Análise dos Resultados . . . . .	46
4.2	Ensaio em Câmara Reverberante - Impacto da Presença de Pessoas e Materiais . . . . .	47
4.2.1	Absorção Sonora de Pessoas e Materiais . . . . .	47
4.2.2	Ruído Produzido por Pessoas em Espaços de Aula . . . . .	50
4.2.3	Conclusão . . . . .	51
4.3	Simulação Acústica (EASE) . . . . .	51
4.3.1	Modelo Arquitectónico . . . . .	52
4.3.2	Parâmetros Acústicos sem Ocupação . . . . .	53
4.3.3	Parâmetros Acústicos com Ocupação . . . . .	59
4.4	Comparação dos Valores Obtidos com Avaliação e Simulação Acústica . . . . .	62
4.5	Conclusões . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Reabilitação Acústica</b>	<b>65</b>
5.1	Princípios Orientadores da Intervenção . . . . .	65
5.2	Anfiteatro B013: Solução Proposta . . . . .	66
5.2.1	Condicionamento Acústico e Respetiva Simulação . . . . .	66
5.2.2	Utilização Natural . . . . .	69
5.2.3	Projeto da Instalação Sonora e Simulação Eletroacústica . . . . .	71
5.2.4	Espaço Antes e Após a Intervenção . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>81</b>
6.1	Satisfação dos Objetivos e Conclusões . . . . .	81
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	82
<b>A</b>	<b>Capacidade vs Qualidade Acústica de Espaços de Aula da FEUP</b>	<b>83</b>
<b>B</b>	<b>Código Matlab</b>	<b>85</b>
B.1	Cálculo do Tempo de Reverberação . . . . .	85
B.1.1	Desenvolvimento do Programa em Matlab . . . . .	85
B.1.2	Função Principal . . . . .	86
B.1.3	Desenho do Filtro de Banda de Terço de Oitava . . . . .	87
B.1.4	Análise Deslizante . . . . .	88
B.2	Cálculo do Parâmetro Definição . . . . .	89
B.3	Cálculo do Parâmetro Claridade . . . . .	89
B.4	Código para Visualização da Resposta Impulsional . . . . .	90
B.5	Cálculo da ETC . . . . .	90
B.6	Formas de Onda do Sinal Acústico . . . . .	90
<b>C</b>	<b>Ruído de Fundo no Anfiteatro B013</b>	<b>91</b>
<b>D</b>	<b>Coefficientes de Absorção dos Materiais do Anfiteatro B013</b>	<b>93</b>
<b>E</b>	<b>Cálculo do Reforço Sonoro (Excel)</b>	<b>95</b>
	<b>Referências</b>	<b>97</b>



# Lista de Figuras

2.1	Divergência sonora da fonte [4] . . . . .	4
2.2	Divergência sonora em espaços fechados [2] . . . . .	5
2.3	Reflexão sonora em espaços fechados (adaptado de [5]) . . . . .	6
2.4	Refletograma [6] . . . . .	6
2.5	Difração sonora [8] . . . . .	7
2.6	QRD [9] . . . . .	8
2.7	Art Diffusor [10] . . . . .	8
2.8	Ressoador de Helmholtz [11] . . . . .	9
2.9	Esquema do ouvido humano (Adaptado de [12]) . . . . .	10
2.10	(a) Área de audição ; (b) Área de audição utilizada pela fala e pela música. (Adaptado de [12]) . . . . .	11
2.11	Curva da zona de fusão do efeito Haas (Adaptado de [12] ) . . . . .	12
2.12	Distância crítica [15] . . . . .	13
2.13	Tempo de reverberação em função do uso e volume (Adaptado de [16]) . . . . .	15
2.14	Pontos de medição da diretividade tanto em elevação $\phi$ como em azimute $\theta$ de um altifalante [21] . . . . .	18
2.15	Diagrama de diretividade de um microfone cardióide (Shure SM58) [22] . . . . .	19
2.16	Geometria de um reforço sonoro simples (Adaptado de [21]) . . . . .	21
2.17	Distância acústica equivalente: (a) sem reforço sonoro; (b) com reforço sonoro. . . . .	22
2.18	Sistema de reforço eletroacústico com altifalante e microfone direcionais (Adaptado de [21]) . . . . .	25
3.1	Metodologia proposta para: (a) desenho corretivo; (b) desenho de raiz . . . . .	30
4.1	Anfiteatro B013 . . . . .	31
4.2	Emissor Brüel & Kjær 4224 . . . . .	33
4.3	Sonómetro Brüel & Kjær 2260 . . . . .	33
4.4	Equipamentos utilizados na cadeia de medição . . . . .	33
4.5	Cadeia de medição com microfones . . . . .	34
4.6	Fonte sonora Yamaha HS 80M . . . . .	34
4.7	Emissor Brüel & Kjær 4225 . . . . .	34
4.8	Recetor Brüel & Kjær 4419 . . . . .	34
4.9	Pontos de medição do Tr com o sonómetro . . . . .	35
4.10	Pontos de medição do Tr com a cadeia de medição . . . . .	36
4.11	Tempo de reverberação na fila 2,6 e 9 com sonómetro . . . . .	36
4.12	Tempo de reverberação na fila 2 e 6 com cadeia de medição . . . . .	37
4.13	Comparação entre os valores obtidos para o tempo de reverberação com os dois métodos utilizados . . . . .	38

## LISTA DE FIGURAS

4.14	Pontos de medição do RASTI . . . . .	39
4.15	RASTI na sala B013 . . . . .	40
4.16	Pontos de medição da definição e clareza . . . . .	41
4.17	Medição do ruído de fundo com o sonómetro . . . . .	42
4.18	Ruído de fundo no anfiteatro B013 (dB) . . . . .	43
4.19	Resposta impulsional do anfiteatro no lugar central da fila 2 com a fonte sonora na posição indicada na figura 4.16 . . . . .	44
4.20	Resposta impulsional do anfiteatro no lugar central da fila 6 com a fonte sonora na posição indicada na figura 4.16 . . . . .	44
4.21	ETC do anfiteatro no lugar central da fila 2 . . . . .	45
4.22	ETC do anfiteatro no lugar central da fila 6 . . . . .	45
4.23	Montagem para ensaio em câmara reverberante . . . . .	47
4.24	Influência das pessoas na absorção sonora . . . . .	48
4.25	Influência dos materiais do anfiteatro B013 na absorção sonora . . . . .	48
4.26	Calibrador 4231 da Brüel & Kjær . . . . .	50
4.27	Vista de edição do modelo EASE do anfiteatro B013 . . . . .	52
4.28	Visão arquitetural do modelo do anfiteatro B013 . . . . .	53
4.29	Altifalante e área e lugares de audiência . . . . .	54
4.30	Tempo de reverberação obtido a partir da simulação em EASE . . . . .	54
4.31	Valores de RASTI obtidos no EASE . . . . .	56
4.32	Valores de $C_{50}$ obtidos no EASE . . . . .	56
4.33	Refletograma do lugar central da fila 2 obtido com EASE . . . . .	57
4.34	Refletograma do lugar central da fila 6 obtido com EASE . . . . .	57
4.35	Resposta impulsional obtida no lugar central da fila 2 com o EASE . . . . .	58
4.36	Resposta impulsional obtida no lugar central da fila 6 com o EASE . . . . .	58
4.37	ETC na fila 2 obtido com EASE . . . . .	59
4.38	ETC na fila 6 obtido com EASE . . . . .	59
4.39	Ocupação total do anfiteatro . . . . .	60
4.40	Tempo de reverberação com ocupação total obtido a partir da simulação em EASE . . . . .	60
4.41	Valores de RASTI com ocupação total obtidos no EASE . . . . .	61
4.42	Comparação entre valores obtidos no local com o sonómetro e os valores simulados . . . . .	62
5.1	Anfiteatro B013 com aplicação de condicionamento acústico (em cor escura) na parede traseira e sua zona próxima do tecto e simulado em EASE . . . . .	67
5.2	Tempo de reverberação obtido a partir da simulação do condicionamento acústico em EASE . . . . .	67
5.3	Valores de RASTI obtidos através da simulação do condicionamento acústico em EASE por meio do complemento de absorção . . . . .	68
5.4	Valores de $C_{50}$ obtidos através da simulação do condicionamento acústico em EASE por meio do complemento de absorção . . . . .	69
5.5	Pressão sonora recebida através do som direto com a utilização natural calculada por meio de simulação no EASE . . . . .	70
5.6	Reforço sonoro . . . . .	71
5.7	Figura auxiliar para o cálculo de $d_1$ e $\theta_1$ . . . . .	72
5.8	Diagrama de diretividade de um altifalante Electro-Voice MH6040c . . . . .	73
5.9	Pressão sonora recebida pelo som direto com reforço eletroacústico simulado em EASE . . . . .	75
5.10	Pressão sonora total simulada em EASE . . . . .	76

5.11	Cadeia de áudio proposta para o reforço sonoro no anfiteatro B013 . . . . .	76
5.12	RASTI com condicionamento acústico e reforço eletroacústico obtido com o EASE	77
5.13	$C_{50}$ com condicionamento acústico e reforço eletroacústico obtido com o EASE .	77
5.14	(a) B013 antes da intervenção no EASE; (b) B013 após intervenção . . . . .	78
5.15	Comparação entre valores de $Tr$ ( $T_{30}$ ) obtidos antes e após intervenção com o EASE	78
B.1	Etapas para o cálculo do tempo de reverberação . . . . .	85
B.2	Sinal acústico no processo de fonte interrompida . . . . .	90
B.3	Sinal acústico no processo de resposta impulsional . . . . .	90

## *LISTA DE FIGURAS*

# Lista de Tabelas

2.1	Relação entre RASTI e avaliação subjetiva . . . . .	17
4.1	Tempo de reverberação medido no anfiteatro B013 com o sonómetro . . . . .	37
4.2	Tempo de reverberação medido no anfiteatro B013 com a cadeia de medição . . .	38
4.3	Análise dos valores obtidos para os parâmetros no anfiteatro B013 . . . . .	46
4.4	Absorção sonora localizada por pessoa e materiais ( $m^2$ ) . . . . .	50
4.5	Ruído produzido por uma pessoa a realizar diversas atividades . . . . .	51
4.6	Ruído produzido por várias pessoas a mexer na cadeira . . . . .	51
4.7	Tempo de reverberação obtido a partir da simulação em EASE . . . . .	55
4.8	Tempo de reverberação com ocupação total obtido a partir da simulação em EASE	61
5.1	Coeficientes de absorção de diversos materiais . . . . .	66
5.2	Tempo de reverberação obtido a partir da simulação do condicionamento acústico em EASE . . . . .	68
C.1	Ruído de fundo (dB) por terços de oitava no anfiteatro B013 . . . . .	91
D.1	Coeficientes de absorção dos materiais do anfiteatro B013 . . . . .	93

## *LISTA DE TABELAS*

# Abreviaturas e Símbolos

$\alpha$	Coefficiente de absorção sonora
$\phi$	Elevação ( $^{\circ}$ )
$\theta$	Azimuth ( $^{\circ}$ )
a	Altifalante
A	Superfície equivalente de absorção sonora ( $m^2$ )
AG	Ganho acústico (dB)
AI	Índice de articulação
$A_j$	Superfície equivalente de absorção sonora localizada ( $m^2$ )
$AL_{CONS}$	Nível de articulação de consoantes
$C_{50}$	Clareza calculada para 50 ms (dB)
d	Distância (m)
$D_{50}$	Definição calculada para 50 ms
$D_a(\theta_a)$	Diretividade do altifalante (dB)
$D_m(\theta_m)$	Diretividade do microfone (dB)
DI	Índice de diretividade (dB)
E	Emissor ou Característica direccional
EAD	Distância acústica equivalente (m)
ETC	Curva temporal do envelope
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FS	Fonte sonora
GM	Gama dinâmica (dB)
I	Intensidade sonora ( $W/m^2$ )
$I_{iso}$	Intensidade sonora produzida por fonte isotrópica ( $W/m^2$ )
$L_I$	Nível de intensidade sonora (dB)
$L_p$	Nível de pressão sonora (dB)
$L_W$	Nível de potência sonora da fonte (dB)
m	Absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ) em função da humidade relativa ou Índice de modulação ou Microfone
M	Microfone
p	Pressão sonora (Pa)
$p_0$	Pressão sonora de referência (Pa)
Q	Coefficiente de direccionalidade
r	Raio (m) ou Distância (m)
R	"Constante R do local"( $m^2$ ) ou Recetor
RASTI	<i>Rapid Speech Transmission Index</i>

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RF	Ruído de fundo (dB ou dBA)
Rx	Recetor
S	Área da superfície ( $m^2$ ) ou Sonómetro
SNR	Relação sinal-ruído (dB)
$S/N_{app}$	Relação sinal-ruído aparente (dB)
STI	<i>Speech Transmission Index</i>
t	Intervalo de tempo (s)
$T_{30}$	Tempo de reverberação para uma queda do sinal de 30dB (s)
Tr	Tempo de reverberação (s)
Tr [250-4kHz]	Tempo de reverberação médio nas frequências das bandas de oitava de 250, 500, 1k, 2k e 4kHz (s)
Tr [500-1kHz]	Tempo de reverberação médio nas frequências das bandas de oitava de 500 e 1kHz (s)
Tr [500-2kHz]	Tempo de reverberação médio nas frequências das bandas de oitava de 500, 1k e 2kHz (s)
Tx	Transmissor
V	Volume ( $m^3$ )
W	Potência sonora (W)



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Sendo os seres humanos dotados da capacidade de comunicar entre si através da palavra, e sendo essa mesma capacidade fulcral em diversas atividades desenvolvidas no quotidiano, torna-se importante uma especial atenção a fatores que possam ter impacto na qualidade desta comunicação.

Diariamente o ser humano é exposto a estímulos sonoros sem que muitas vezes se aperceba do impacto que estes têm. Começando por referir o caso do ruído exterior, sendo este definido como um som desagradável ou indesejável para o ser humano, podem identificar-se alguns exemplos de ruídos associados a automóveis, a vários tipos de aparelhos electrónicos bem como ruídos da natureza. Estes podem perturbar a nossa percepção na receção de outros sinais sonoros afetando a comunicação. Este tipo de ambiente sonoro identifica-se como passivo. Existe ainda outro tipo de estímulo sonoro identificado como ativo e que está associado a sons como a fala humana. A comunicação pode assim ser bastante prejudicada com o ruído, no entanto, há formas de o evitar em locais fechados se estes estiverem devidamente adaptados de forma a proporcionar uma comunicação confortável e eficaz.

Não só a comunicação acústica é perturbada por fatores de ruído como também por fatores de carência acústica dos espaços. No seu projeto e construção nem sempre é dada a devida importância aos fatores acústicos dos mesmos, seja ao nível da planta de construção do espaço como ao nível de materiais usados. Assim, o projetista toma um lugar de peso na prevenção deste problema se for consciente do mesmo. Esta consciência passa por dar a devida atenção à finalidade do espaço de forma a que este seja otimizado e não apresente entraves à comunicação.

### 1.2 Motivação

Na sociedade atual ainda não há uma grande preocupação com os problemas acústicos dos locais diariamente frequentados, no entanto, se for feita uma análise a este assunto, rapidamente se constata o quão prejudicados por vezes somos devido à má acústica de um espaço, seja pelo

## *Introdução*

esforço excessivo para a compreensão de algo que está a ser falado, seja pelo esforço vocal do orador. Nesta dissertação este problema é abordado no âmbito particular de um espaço da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sendo esta frequentada diariamente por milhares de alunos e por um grande número de oradores que são expostos a estes problemas e que vêm a sua atividade prejudicada por não ser dada a devida atenção a este problema. Constatando a diminuição de eficácia das atividades humanas e do conforto do orador/recetor nas atividades diárias como, por exemplo, uma aula e ainda, havendo meios técnicos e teóricos que permitam melhorar esta situação, a motivação desta dissertação centra-se em intervir no problema apresentado e preencher uma lacuna que existe no mercado da engenharia acústica, nomeadamente a inexistência de soluções económicas e eficazes em situações de intervenção correctiva. Serve ainda esta dissertação de motivação para outras instituições intervirem nas suas instalações e providenciarem aos seus alunos e técnicos uma melhor comunicação.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo desta dissertação centra-se na aprendizagem e domínio da avaliação de espaços a nível acústico por parte do autor a partir do estudo teórico e da aplicação. Aquando da sua conclusão é esperada a obtenção de competências por parte do autor no desenho acústico. Especificamente, nesta dissertação, estas competências serão adquiridas com a análise de um espaço da FEUP e com a proposta de soluções para os esperados problemas. Pretende-se assim, com esta proposta, uma futura intervenção no espaço analisado de forma a proporcionar um maior conforto acústico às pessoas que o frequentam diariamente, permitindo uma melhor qualidade de aprendizagem para os estudantes e um esforço vocal mais reduzido para os professores.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

Para além da introdução, esta dissertação contém mais 5 capítulos.

No capítulo 2 é feita uma breve revisão bibliográfica de conceitos importantes no âmbito da acústica e eletroacústica, que serão essenciais para compreender o trabalho desenvolvido.

No capítulo 3 é proposta uma metodologia para o estudo, avaliação e desenho acústico de espaços de aula apresentando os vários passos a seguir para o desenho de raiz e desenho corretivo.

No capítulo 4 é apresentado o estudo desenvolvido no anfiteatro B013 da FEUP, os valores obtidos para os parâmetros acústicos descritivos do mesmo através da experimentação e simulação e ainda um ensaio na câmara reverberante da FEUP.

No capítulo 5 são apresentados métodos de intervenção num espaço, e ainda, sugestões de melhoria a aplicar no espaço analisado.

Finalmente, no capítulo 6 é feita a conclusão do estudo e uma pequena reflexão sobre possíveis desenvolvimentos futuros.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Para uma melhor compreensão do trabalho apresentado neste documento, é feita uma breve revisão dos conceitos básicos no contexto da acústica e quais os métodos a adotar para corrigir defeitos acústicos em espaços fechados. Começando por referir os fenómenos associados à acústica, e que se devem ter em mente, irá ser feita uma pequena revisão dos conceitos de divergência sonora da fonte, reflexão, refração, difração, difusão, absorção sonora e ainda das ressonâncias da sala e das cavidades.

Sendo este estudo centrado na acústica de espaços de aula, é de extrema importância compreender a relação entre o som recebido pelo ouvinte e o efeito do espaço sobre esse mesmo som. Desta forma, é necessário começar por compreender o modo de funcionamento da comunicação acústica e os fatores humanos psicoacústicos envolvidos na transmissão e receção da palavra, e ainda, compreender o conceito de campo direto e campo reverberado. Este é importante no âmbito do estudo desenvolvido porque se sabe que o campo reverberado tem uma grande influência na qualidade com que o som é ouvido.

É ainda importante referir aspetos que possibilitam a caracterização de um espaço e que analisados permitem chegar a conclusões sobre a sua qualidade acústica. Desta forma identificam-se dois tipos de parâmetros acústicos, os objetivos e os subjetivos. Os primeiros referem-se a valores obtidos por equipamentos a partir de cálculos temporais ou energéticos do sinal e os segundos estão relacionados com opiniões de indivíduos pelo que os valores obtidos são subjetivos e dependentes da pessoa que os avalia. Entre os parâmetros objetivos encontram-se o tempo de reverberação, a claridade, a intensidade sonora, e outros. Entre os parâmetros subjetivos encontram-se a intensidade subjetiva do som, a reverberância e o eco [1].

Para o desenho acústico de uma espaço da FEUP, os conceitos mais importantes e que vão ser descritos com mais detalhe de seguida são o tempo de reverberação, a claridade, a definição e a inteligibilidade da palavra.

É ainda apresentado o conceito de eletroacústica que será muito importante nesta dissertação porque se apresenta como uma possível solução de melhoria de espaços com deficiência acústica.

Finalmente, é feita uma breve referência sobre os *softwares* existentes no mercado associados ao desenho acústico, abordando o modo de funcionamento dos mesmos e as suas funcionalidades.

## 2.1 Fenómenos Acústicos

### 2.1.1 Divergência Sonora da Fonte

Existindo uma fonte sonora omnidirecional a radiar som num ponto fixo central, como na figura 2.1, observa-se uma propagação esférica do som, e a intensidade sonora irá diminuir com a distância. Uma vez que a área de uma superfície esférica é  $4.\pi.r^2$ , a área de um segmento na superfície da esfera varia proporcionalmente ao quadrado do raio. Assim, se a distância duplicar, a intensidade sonora que atravessa esse novo segmento irá diminuir para 1/4. Desta forma, pode-se afirmar que a intensidade do som num espaço livre é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Esta conclusão é facilmente tirada a partir da equação 2.1. Como a intensidade é proporcional ao quadrado da pressão sonora então conclui-se que a pressão sonora num ponto é inversamente proporcional à distância à fonte. Assim, em decibel, sabe-se que há uma queda de 6dB quando a distância aumenta para o dobro, tendo em conta que esta conclusão se aplica para espaço livre [2, 3].

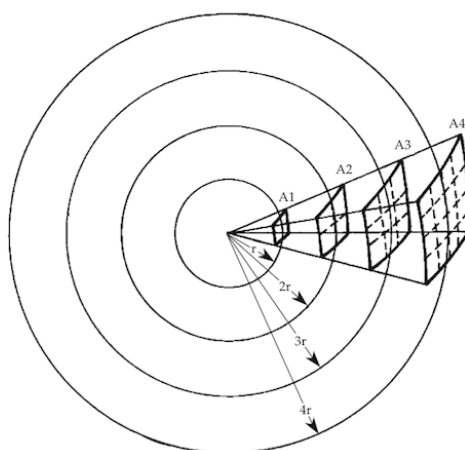


Figura 2.1: Divergência sonora da fonte [4]

$$I = \frac{W}{4\pi.r^2} \quad (2.1)$$

em que,

I - intensidade sonora ( $W/m^2$ );

W - potência sonora (W);

r - distância (m).

Para espaços fechados a reflexão sonora das superfícies envolventes afeta a forma como o nível sonoro decresce com a distância, no entanto ainda se observa o comportamento descrito anteriormente perto da fonte. No seguinte gráfico observa-se o comportamento descrito onde inicialmente, a menores distâncias, temos um comportamento semelhante ao observado em espaços

abertos mas, quando a distância à origem aumenta, o campo reverberado já vai ter impacto no nível de pressão sonora do espaço.

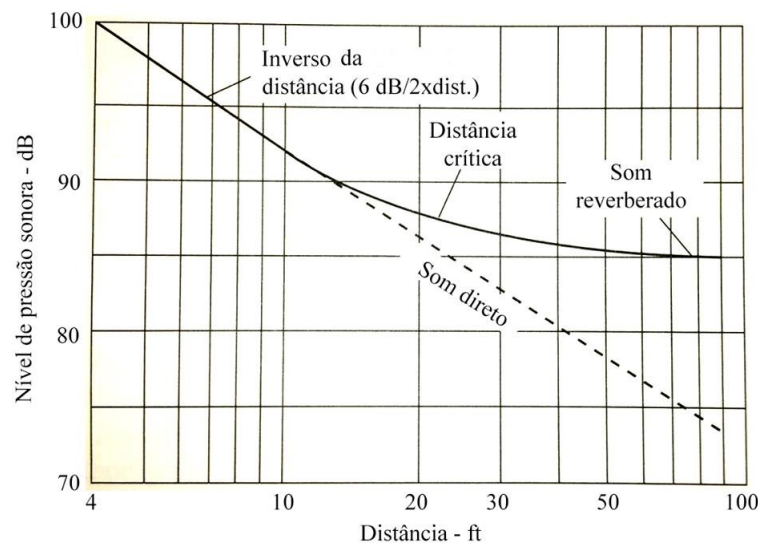


Figura 2.2: Divergência sonora em espaços fechados [2]

### 2.1.2 Reflexões Sonoras

As reflexões são um dos fenômenos mais importantes a ter em conta para a acústica de um espaço. Estas são provocadas pela envolvente do espaço em análise e são afetadas pela forma e materiais com que a sala é constituída. Assim, um dado ouvinte além de receber o som direto da fonte irá também receber várias reflexões do som ocorridas no espaço que o rodeia. Este conceito será importante mais à frente quando se aborda o tempo de reverberação de um espaço.

A distância média que um som percorre entre sucessivas reflexões é dada pela expressão  $4V/S$ , onde  $V$  é o volume do espaço e  $S$  é a área da superfície interior da envolvente do espaço [2].

É de salientar que as reflexões sonoras que atingem o recetor até 50 ms após a receção do som direto são denominadas de som inicial (*early sound*) e as recebidas posteriormente são denominadas de som tardio (*late sound*). As componentes iniciais da reverberação chegam ao ouvido do recetor num intervalo de tempo suficientemente pequeno para o cérebro ignorar o seu atraso e utilizá-las para melhorar a percepção do sinal. Atribui-se ainda o termo de "tempo de atraso inicial" ao intervalo de tempo entre a chegada do som direto e o da primeira reflexão.

Quando existem reflexões que chegam suficientemente atrasadas e com intensidade elevada para serem distinguidas pelo ouvido humano ocorre o fenómeno denominado eco. Este pode ser bastante prejudicial para uma boa percepção sonora. Ocorre quando existe uma diferença temporal superior a 50 ms. Para evitar os ecos indesejáveis coloca-se material absorvente ou modifica-se o ângulo da superfície de forma a redirecionar a reflexão para um local não prejudicial. Outro defeito acústico que pode ocorrer num espaço fechado é o eco repetido (*flutter echo*). Este surge quando duas paredes paralelas refletem consecutivamente o som original. Para corrigir este fenómeno

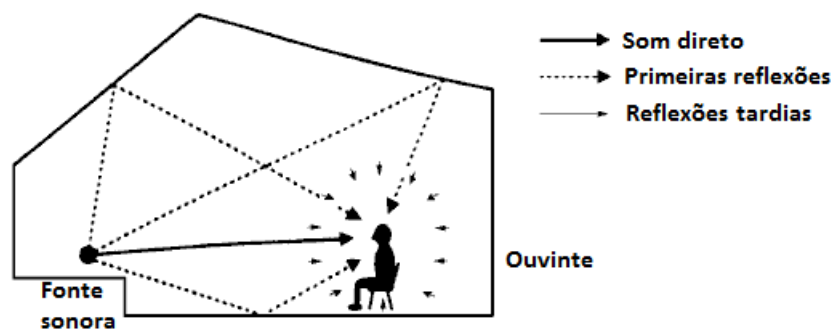


Figura 2.3: Reflexão sonora em espaços fechados (adaptado de [5])

recomenda-se reorientar as superfícies ou colocar material difusor ou absorvente num dos lados [1].

### 2.1.2.1 Refletograma

O refletograma é uma representação das reflexões recebidas em determinado local de um espaço fechado apresentando a intensidade sonora do sinal recebido para um dado instante de tempo. Esta representação é muito útil para a compreensão do comportamento do espaço e de que forma se deve intervir no mesmo para melhorar a sua acústica, uma vez que permite determinar a origem das reflexões prejudiciais através do tempo de atraso na sua receção.

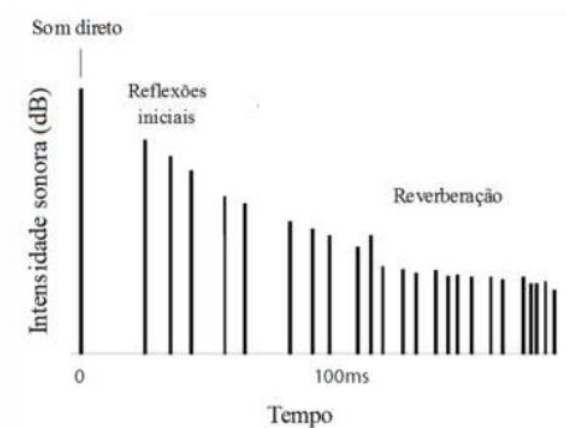


Figura 2.4: Refletograma [6]

### 2.1.3 Refração Sonora

A refração é o fenómeno associado à eventual mudança de direção de propagação de um som ao encontrar meios diferentes caracterizados por diferentes velocidades de propagação.

Como exemplo, num dia de sol, a camada de ar mais próxima do chão é mais quente em comparação com outras mais altas, pelo que, o som sofre uma curvatura no sentido de sublimação do ar, que pelo facto de estar mais quente, se torna mais denso, tendo assim impacto na propagação

sonora e tornando o som indefinido a longas distâncias. Pelo contrário, quando o ar mais próximo do chão é mais frio, a curvatura inverte-se melhorando as condições de qualidade sonora a mais longas distâncias.

### 2.1.4 Difração do Som

Por vezes, quando é emitido um som num espaço físico diferente de onde o recetor se encontra, é possível ainda assim ouvi-lo devido ao fenómeno da difração. Este está associado à distorção da propagação retilínea do som, quando contorna um obstáculo. A representação deste fenómeno está presente na figura 2.5. Para que um som sofra difração, é necessário que a dimensão do obstáculo seja inferior ou semelhante ao comprimento da onda sonora [7].

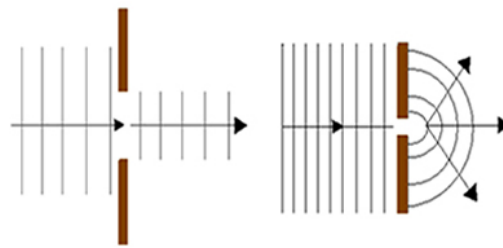


Figura 2.5: Difração sonora [8]

### 2.1.5 Difusão do Som

Em acústica, a difusão sonora consiste na distribuição da energia sonora uniformemente num certo espaço. Assim, uma superfície difusora, é aquela que reflete em todas as direções, e para uma superfície ser acusticamente difusora, precisa de ter irregularidades com algum relevo. Sendo que o tamanho dessas irregularidades determina que frequências de onda sonora são refletidas (em função dos respetivos comprimentos de onda). Desta forma, sabe-se que uma superfície com pequenos relevos só será difusa para altas frequências [1]. Este conceito de difusão acústica e como obtê-la foi revolucionada por Schroeder, o qual criou o difusor de Schroeder. É possível obter a difusão descrita a partir de vários dispositivos comerciais, tais como:

- QRD- Quadratic Residue Diffuser;
- Art Diffusor.

Nas figuras 2.6 e 2.7 encontram-se fotos dos dois dispositivos referidos anteriormente.

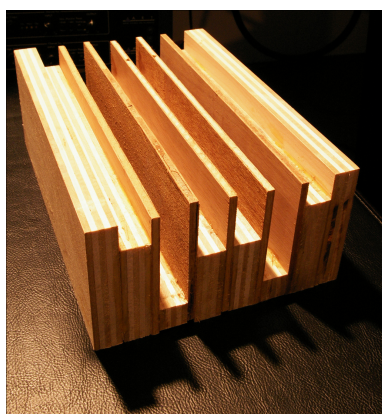


Figura 2.6: QRD [9]

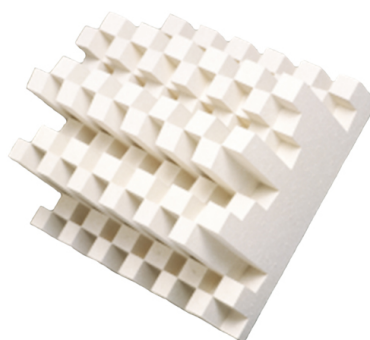


Figura 2.7: Art Diffusor [10]

### 2.1.6 Absorção Sonora

Absorção sonora é a propriedade que possuem certos materiais de poderem transformar parte da energia sonora que sobre eles incide em outra qualquer modalidade de energia, geralmente a térmica [1]. Assim, para determinar se um material é absorvente, utiliza-se o coeficiente de absorção sonora que relaciona a quantidade de energia sonora que é absorvida por determinado material com aquela que sobre ele incide. Este coeficiente varia entre 0 e 1. Um material muito refletor apresenta uma absorção sonora quase nula e os materiais absorventes um coeficiente com valor superior a 0,5. O coeficiente de absorção de um material varia com a frequência e com o ângulo de incidência da onda sonora no material [2].

Para adaptar um espaço acusticamente podem-se utilizar vários tipos de materiais e sistemas absorventes. Estes podem ser agrupados em três categorias diferentes em função das suas características: porosos/fibrosos, ressoadores e membranas. Estes três tipos atuam em diferentes gamas de frequências sendo os primeiros mais indicados para altas frequências, os segundos para médias frequências e os últimos para baixas frequências. Entre os materiais porosos e fibrosos estão os tecidos e alcatifas, massas porosas, aglomerados de fibras de madeira, fibras minerais, materiais plásticos e aglomerados de cortiça. Nos ressoadores é possível fazer uma distinção entre ressoadores isolados e agrupados [1].

### 2.1.7 Ressonâncias da Sala

Esta secção incide nos modos próprios de uma sala, sendo que, nas baixas frequências, muitos espaços são dominados por ondas estacionárias que fazem surgir a imagem de decaimento ondulante. Estes modos próprios são formados quando, de todos os caminhos que as ondas sonoras seguem dentro de um compartimento, há caminhos que se repetem criando percursos de propagação coincidentes que se repetem no tempo. Essas ondas, usando o mesmo percurso mas com direções opostas, produzem ondas estacionárias, criando assim, ressonância e zonas da sala com reforços e atenuações face à média. Este fenómeno é mais evidente se a sala tiver forma próxima da paralelepípedica e com pouca difusão [1].



### 2.1.8 Ressonâncias de Cavidades

Os ressoadores de cavidades (ou ressoadores de Helmholtz) são, como referido anteriormente, sistemas com maior utilidade para atuar nas médias frequências [1]. A sua função é absorver energia acústica numa banda relativamente estreita, comportando-se como um filtro rejeita-banda na reflexão sonora. Este tipo de ressoador é formado por uma cavidade (de paredes rígidas) com uma única abertura estreita. A frequência de ressonância deste sistema depende do volume da cavidade e das outras dimensões geométricas, sobretudo as do gargalo. Na figura 2.8 está presente uma foto de um ressoador de Helmholtz.



Figura 2.8: Ressoador de Helmholtz [11]

## 2.2 Comunicação Acústica e Fatores Humanos Psicoacústicos

A comunicação acústica é um dos pilares da vida em sociedade, e no geral, consiste na capacidade do homem interagir com a natureza ao seu redor a partir da captação auditiva em conjunto com a interpretação sensitiva do cérebro. Assim, torna-se vantajoso ter um conhecimento básico da forma como o ser humano ouve e percebe o som.

### Audição humana e Sistema Auditivo

O sistema auditivo humano é uma ferramenta bastante complexa. O seu trabalho é traduzir as flutuações na pressão atmosférica ambiente e transformá-las em sinais elétricos que irão ser processados pelo cérebro e percebidas pelo ouvinte [12]. Este sistema é normalmente dividido em três partes: ouvido externo, médio e interno. Os elementos mais importantes da primeira parte, ou seja, do ouvido externo, são o pavilhão da orelha, o canal auditivo e o tímpano. Do ouvido médio é de referir os ossículos (martelo, bigorna e estribo). Finalmente, do ouvido interno é de salientar a cóclea como elemento importante da cadeia auditiva [1]. Na figura 2.9 observa-se uma representação do sistema referido.

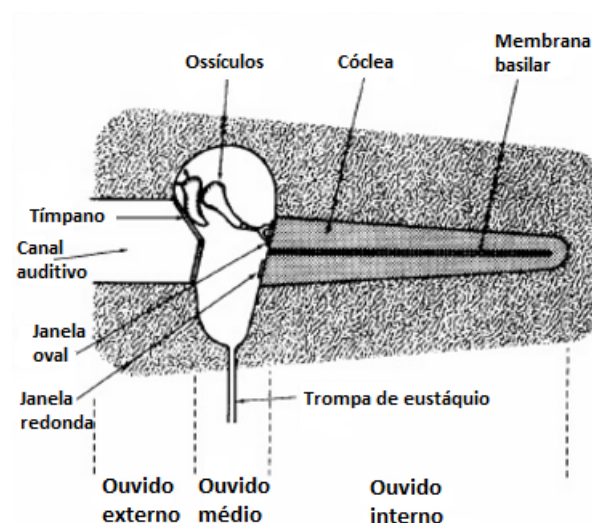


Figura 2.9: Esquema do ouvido humano (Adaptado de [12])

O limiar da audição humana é de cerca de 0,00002 Pa a médias frequências e, para as mesmas, o sistema humano consegue aguentar picos de até 200 Pa. Isto faz com que a gama dinâmica(GM) do sistema auditivo humano seja:

$$GM = 20 \log \left( \frac{200}{0,00002} \right) = 140dB \quad (2.2)$$

No entanto, o sistema auditivo não consegue aguentar ser exposto a este nível por muito tempo sem sofrer danos. Sistemas baseados na fala são normalmente desenhados para 80 dBA e sistemas para música para cerca de 90 dBA, ambos com referência de 20  $\mu$ Pa.

Uma vez que o ouvido humano tem uma sensibilidade variável em frequência, surgiu a necessidade de "corrigir" os equipamentos para exprimir esta particularidade humana. Assim, introduziram-se filtros eletrónicos nos aparelhos de medida que corrigem os valores obtidos. Utiliza-se o filtro A para aproximar à resposta humana os ruídos de fraca intensidade. Desta forma, o nível sonoro expresso em dBA é um valor global e é a tradução por um só valor, da energia acústica de um ruído filtrado por uma curva de ponderação A [12, 1].

## Psicoacústica

Após o estudo da constituição do sistema auditivo surge outro conceito importante de abordar sendo este o conceito de psicoacústica. Esta apresenta a relação entre as características do som e a sensação auditiva que ele provoca. As sensações auditivas são determinadas pelas características físicas do som, como a amplitude e frequência, mas também por características temporais.

A resposta temporal do sistema auditivo humano é lenta quando comparada com o número de eventos que podem ocorrer nesse intervalo de tempo uma vez que integra chegadas sonoras muito próximas (dentro de cerca de 35 ms) em relação ao nível [12]. É este fenómeno que faz com que

o som dentro de um espaço parece mais forte do que o que se observa ao ar livre, uma vez que existem reflexões na envolvente que chegam ao ouvido dentro do tempo de integração, aumentando o nível do sinal. No entanto, reflexões após os 50 ms ou mais podem tornar-se problemáticas e ser entendidas como eco.

Na figura 2.10a é apresentada a área auditiva que representa o intervalo de frequência e pressão ouvidas pelo ser humano. Abaixo do limiar de audição os sons não são ouvidos e acima do limiar de sensação o nível sonoro torna o mesmo doloroso.

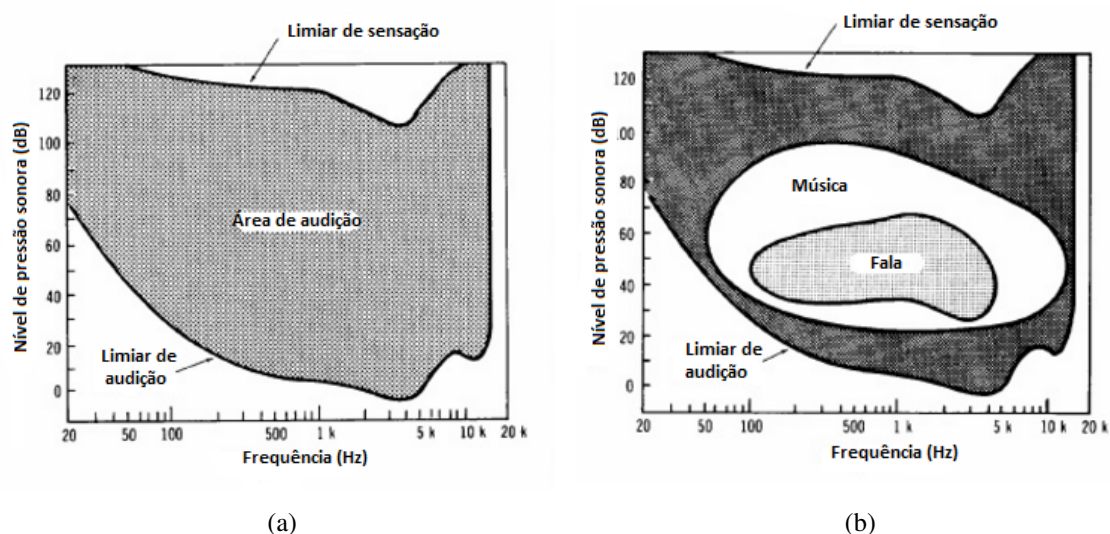


Figura 2.10: (a) Área de audição ; (b) Área de audição utilizada pela fala e pela música. (Adaptado de [12])

No entanto, a fala não utiliza toda a área auditiva. A sua gama dinâmica e frequencial são limitadas, assim como as da música, apesar da última apresentar uma gama maior. Na figura 2.10b é possível observar a gama usada pela fala e pela música em comparação com a área de audição.

O ser humano, ouvindo um som, consegue facilmente identificar a sua origem. No processo de localização de um som, os mecanismos do ouvido e do cérebro utilizam diversos tipos de dados dependentes do ângulo de chegada do mesmo. Uma vez que os ouvidos estão separados aproximadamente 20 cm, os sons recebidos por cada um deles são diferentes. Um ouvido recebe o som antes do outro, excepto se a fonte sonora estiver colocada no plano médio da cabeça (sagital).

Os espetros dos sinais que entram em cada ouvido também diferem sendo uma das razões para tal facto centrada em processos de difração causados pela cabeça e orelhas. A acrescentar a estas diferenças de características do sinal recebido por cada ouvinte, é ainda possível adicionar a diferença de amplitude do som recebido por cada ouvido. Todos estes fatores são processados pelo cérebro, permitindo uma perceção de direcção da fonte por parte do ouvinte. A velocidade finita do som assegura que o som recebido pelo ouvinte seja espalhado no tempo, principalmente devido a reflexões de superfícies próximas.

Sabe-se que atrasos na ordem de poucas centenas de microsegundos são utilizados pelo mecanismo ouvido-cérebro como forma de localização espacial da fonte. Para atrasos superiores (até 50 ms), surge um conceito novo denominado efeito de Haas. Este consiste na existência de uma zona de fusão do som onde é possível que dois sons sejam percebidos como um só. Este efeito será analisado em mais detalhe de seguida. Se o valor do atraso das reflexões aumentar para a região de 50 ms a 100 ms, o som irá cada vez mais ser entendido como eco.

### Efeito Haas

Em 1951, Helmut Haas, provou que se a intensidade das reflexões sonoras de um espaço nos primeiros 50 ms após a receção do som direto estiver compreendida entre os 5 e os 10 dB acima do nível sonoro do mesmo, este não será compreendido como eco [6]. Na figura 2.11 observa-se o gráfico que ilustra o efeito descrito. Se dois sons distintos respeitarem este efeito, estando abaixo da curva apresentada, sendo esta denominada curva de zona de fusão, então os dois sons serão percebidos pelo recetor como um só. Caso contrário poderá ocorrer o fenómeno do eco, sendo este o que apresenta influência negativa na inteligibilidade da palavra [13]. Para valores até 4 dB de diferença, a direção percebida pelos ouvintes será a da primeira frente de onda recebida [14]. Este efeito também tem sido referido como efeito de precedência ou lei da primeira frente de onda.

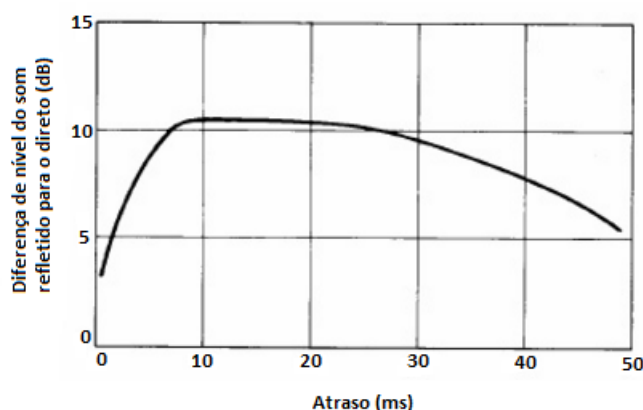


Figura 2.11: Curva da zona de fusão do efeito Haas (Adaptado de [12] )

Esta descoberta pode ser aplicada a sistemas de reforço sonoro onde, para altifalantes colocados em locais diferentes da origem, estes podem ser atrasados eletronicamente para um valor que iguale o tempo de percurso do som da origem ao recetor, permitindo um aumento da intensidade do sinal recebido sem consequências negativas para a percepção da localização da origem espacial do primeiro emissor.

## 2.3 Campo Direto e Campo Reverberado

Num espaço fechado, o som em cada ponto pode ser definido como a soma instantânea do campo direto com o reverberado nesse ponto, sabendo-se que o campo direto viaja em linha reta a partir da fonte enquanto o reverberado é o produto de várias reflexões na envolvente. Assim, num espaço, há áreas onde o campo direto predomina enquanto noutras predomina o campo reverberado, verificando-se que o primeiro decresce com a distância à fonte e que o segundo depende apenas da componente de absorção sonora da sala. Desta forma, surge um novo conceito denominado distância crítica. A distância crítica é o valor da distância à fonte onde o contributo da componente de reverberação iguala o contributo da componente direta como se pode observar na figura 2.12.

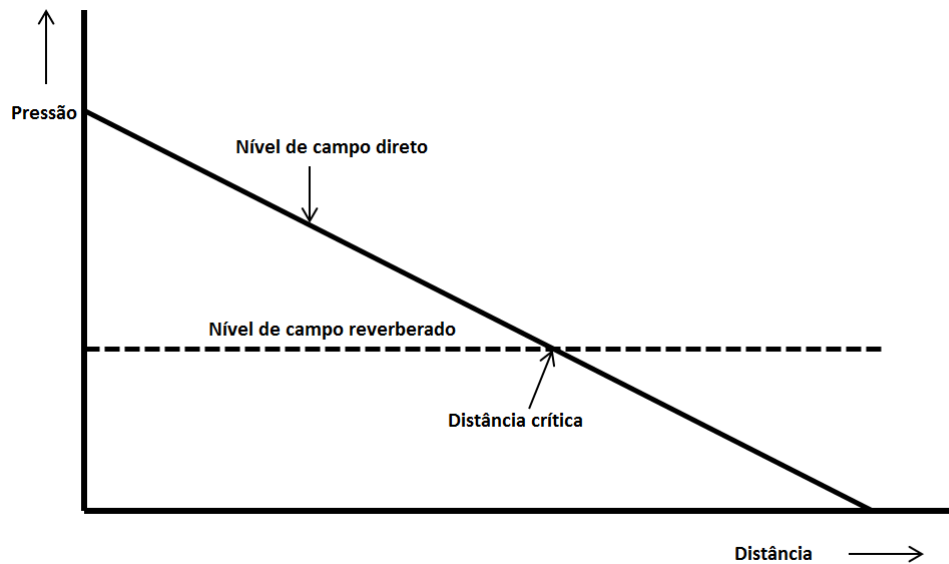


Figura 2.12: Distância crítica [15]

Assim, é possível estudar espaços acusticamente com base nestes conceitos utilizando a seguinte expressão:

$$L_I = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.3)$$

em que,

$L_I$  - nível de intensidade sonora no ponto em estudo (dB);

$L_W$  - nível de potência sonora da fonte (dB);

$Q$  - coeficiente de direccionalidade da fonte sonora;

$r$  - distância entre a fonte sonora e o recetor (m);

$R$  - Constante  $R$  do local =  $A/(1-\alpha_{medio})(m^2)$ .

Desta forma, pode-se atuar no campo direto e no reverberado mudando os parâmetros Q e R (sendo A a superfície equivalente de absorção que é obtida pela soma do resultado do produto do coeficiente de absorção sonora de um material e da superfície real do mesmo para todos os materiais existentes no espaço).

## 2.4 Parâmetros Acústicos Objetivos

### 2.4.1 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para o nível de pressão sonora de um sinal decair 60dB desde que a fonte sonora pára de emitir num determinado espaço, em geral fechado. É normalmente medido para uma queda de 20 ou 30dB do sinal e depois multiplicado por um fator de 3 ou 2 respetivamente, uma vez que raramente as condições práticas permitem obter o decaimento desejado de 60dB. Para o cálculo deste parâmetro existem diversas fórmulas tais como a de Sabine, a de Eyring, a de Millington-Sette, e outras. No entanto pode-se exemplificar e sistematizar a fórmula do pioneiro W.C.Sabine [1] da seguinte forma:

$$Tr = \frac{0,16.V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i.S_i + \sum_{j=1}^M A_j + m.V} \quad (2.4)$$

em que,

Tr - Tempo de reverberação (s);

V - Volume do compartimento ( $m^3$ );

$\alpha_i$  - Coeficiente de absorção sonora do material i (sem unidades);

$S_i$  - Superfície real do material i ( $m^2$ );

$A_j$  - Absorções sonoras localizadas( $m^2$ );

m - Absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ) em função da humidade relativa.

O tempo de reverberação pode apresentar efeitos tanto positivos como negativos. Um valor mais elevado permite aumentar o nível sonoro médio uma vez que há um acréscimo do som refletido ao som direto, no entanto tem o efeito negativo de mascarar os sons diretos devido à sobreposição dos dois sons. Na palavra, este efeito de sobreposição pode ter resultados bastante negativos uma vez que reduz a inteligibilidade da mesma.

O parâmetro em análise e a sua variação estão relacionados com as condições geométricas e com as características de absorção sonora do espaço. De seguida, é apresentado um gráfico que representa os valores dos tempos de reverberação ideais em função do uso e volume dos espaços.

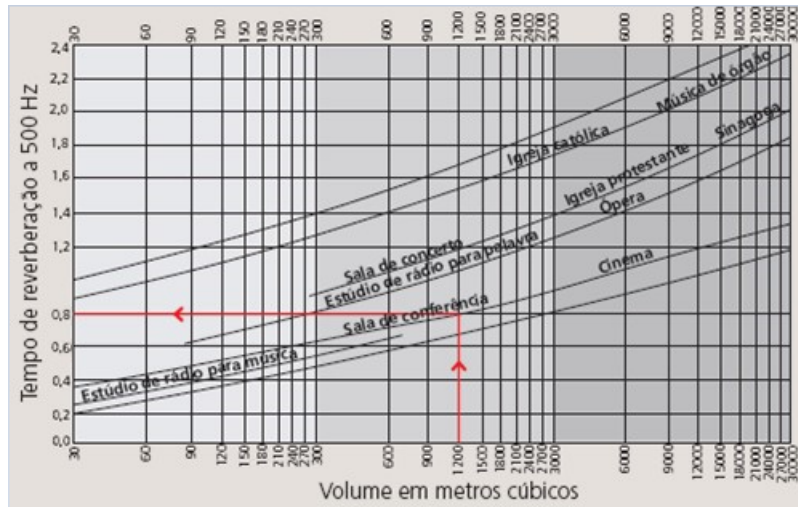


Figura 2.13: Tempo de reverberação em função do uso e volume (Adaptado de [16])

### 2.4.2 Claridade ( $C_{50}$ )

O parâmetro "claridade" tem também importância no estudo do desenho acústico de um espaço para fins da oratória, uma vez que permite avaliar a relação entre a intensidade do som direto com as suas primeiras reflexões e a intensidade das reflexões tardias provocadas pela envolvente de um determinado espaço. Este parâmetro é obtido através da razão em dB entre a energia recebida nos primeiros 50 ms (som direto e primeiras reflexões) e a energia registada após os primeiros 50 ms do sinal recebido. É utilizado o valor 50 ms uma vez que este é normalmente considerado o limite de perceptibilidade no que diz respeito à palavra [1].

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad (2.5)$$

O valor mínimo aceitável para este parâmetro é de 0 dB, sendo o valor recomendado de pelo menos 4 dB [17].

### 2.4.3 Definição ( $D_{50}$ )

O estudo do parâmetro "definição" é também importante por razões semelhantes às da clareza da palavra. No entanto, estes dois parâmetros diferem na fórmula de cálculo.

A "definição" é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total do sinal recebido [1].

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.6)$$



Quanto maior for o valor de  $D_{50}$ , melhor será a inteligibilidade da palavra na sala. De um modo geral, este valor deverá ser superior a 0,5 [18].

Este parâmetro está relacionado com a claridade para a voz ( $C_{50}$ ) a partir da seguinte expressão [13]:

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad (dB) \quad (2.7)$$

que é congruente com as definições das duas grandezas.

## 2.5 Inteligibilidade da Palavra

A inteligibilidade é uma quantidade que define o quão compreensível é um discurso em certas condições. Esta é afetada pela qualidade do sinal de fala, pelo ruído da sala, pela relação entre o som direto e o reverberante e pelo tempo de reverberação. A inteligibilidade da palavra pode ser medida com recurso a parâmetros subjetivos e estimada com parâmetros objetivos. Nos subjetivos a inteligibilidade é proporcional ao grau de acerto de um grupo de indivíduos após ouvirem e terem que escrever certas palavras que são emitidas. Entre os parâmetros objetivos estão o AI (índice de articulação), o  $AL_{CONS}$  (nível de articulação de consoantes), o STI (*speech transmission index*) e o RASTI. Este último será alvo de uma análise mais aprofundada pela importância que lhe foi atribuída no contexto desta dissertação.

O RASTI (rapid speech transmission index) é uma alternativa simplificada do STI. Para o calcular utiliza-se um emissor sonoro na posição do orador que gera um sinal de teste em duas bandas de oitava, uma centrada em 500Hz e outra centrada em 2kHz, que é modulado sinusoidalmente por várias frequências com o intuito de simular a voz humana [19]. No local onde é pretendido estimar a inteligibilidade coloca-se um microfone omnidirecional a captar o som. Posteriormente é calculada a relação entre os índices de modulação inicial ( $m_i$ ) e final ( $m_o$ ) através da seguinte expressão para todos os sinais captados:

$$m = \frac{m_o}{m_i} \quad (2.8)$$

Após obtidos os valores  $m$ , converte-se cada um deles para  $(S/N)_{app}$  a partir da fórmula seguinte e o valor assim obtido pode ser interpretado como uma relação sinal-ruído aparente:

$$(S/N)_{app} = 10 \log \left( \frac{m}{1 - m} \right) \quad (2.9)$$

Todos estes valores de  $(S/N)_{app}$  deverão estar compreendidos entre -15dB e +15dB. Se houver algum valor a exceder, este será igualado ao limite superior ou ao inferior e posteriormente é feita a média de todos os valores de  $(S/N)_{app}$ .



Finalmente, para calcular o RASTI, utiliza-se a equação seguinte para converter o valor de  $(S/N)_{app}$  numa escala de 0 a 1 [17]:

$$RASTI = \frac{\overline{(S/N)_{app}} + 15}{30} \quad (2.10)$$

em que,

$\overline{(S/N)_{app}}$  - média da SNR aparente.

Os valores do RASTI variam entre 0 (péssima inteligibilidade) e 1 (perfeita inteligibilidade). De seguida é apresentada a tabela 2.1 com a referida classificação .

Tabela 2.1: Relação entre RASTI e avaliação subjetiva

RASTI	Classificação subjetiva da inteligibilidade
[0-0,30[	Má
[0,30-0,45[	Fraca
[0,45-0,60[	Razoável
[0,60-0,75[	Boa
[0,75-1]	Excelente

Da inspeção da tabela 2.1 constata-se que os valores de RASTI devem ser não inferiores a 0,6 no caso presente, o que corresponde a uma inteligibilidade "boa".

## 2.6 Eletroacústica

A eletroacústica é a área de estudo da acústica onde se utilizam sistemas eletrónicos para intervir acusticamente num espaço. Assim, é importante referir a existência do reforço sonoro como meio de intervenção acústica, e ainda, a sua relevância e componentes.

O reforço sonoro consiste na amplificação de um sinal que está a ser gerado simultaneamente à sua produção sendo que o ouvinte recebe dois sons: o que lhe chega direto da fonte sonora e o que é originário do sistema de amplificação [20]. O reforço sonoro pode melhorar o som direto e consiste em aumentar a sua distribuição num espaço. O objetivo dos projetos de reforço sonoro é conseguir reproduzir um som de alta qualidade, aliado a fatores como direcionalidade, nível de pressão e inteligibilidade. É assim pretendido obter uma distribuição uniforme do som na área de audiência com predominância do som direto [21].

Deverá ser tido em conta que a qualidade do reforço sonoro está intimamente ligado à qualidade acústica do local onde se insere. Desta forma, um sistema de reforço sonoro não serve em geral como corretor de deficiências acústicas do espaço.

O sistema de som é normalmente constituído por altifalantes e microfones colocados estrategicamente de forma a obter o máximo proveito dos mesmos. O conjunto destes transdutores e da

aparelhagem eletrônica de processamento, controlo e transmissão denomina-se em geral, instalação sonora.

### 2.6.1 Diretividade e Intensidade

Num sistema de reforço sonoro é essencial ter em conta as diretividades e sensibilidades do microfone e altifalante utilizados. Relativamente às características direcionais do altifalante, estas dependem da configuração geométrica do transdutor sonoro e do seu invólucro, e permitem prever a forma como a energia sonora se distribui num meio.

Em geral, podem-se dividir os recetores e emissores em dois grandes grupos. Os elementos omnidireccionais ou isotrópicos, que radiam/captam a energia em todas as direções de maneira uniforme, e os elementos direccionais, que são os que possuem direções em que a emissão/receção é mais intensa do que nas restantes. O grau de direcionalidade varia entre dispositivos e em função da frequência.

O carácter diretivo, ou direcional, de uma fonte pode ser expresso por meio de certos descritores técnico-científicos. Normalmente, é utilizada uma representação gráfica que apresenta a distribuição sonora no espaço em redor da fonte/recetor, sendo esta denominada de diagrama de diretividade. Trata-se de uma descrição gráfica da magnitude da resposta do transdutor em campo distante em função da direção de propagação das ondas sonoras planas e para uma dada frequência. O diagrama de diretividade de uma fonte situada no centro de uma esfera de raio  $r$  representa a pressão sonora em função dos ângulos em azimuth,  $\theta$ , e em elevação,  $\phi$ , estando as posições de medição representadas na figura 2.14 [21].

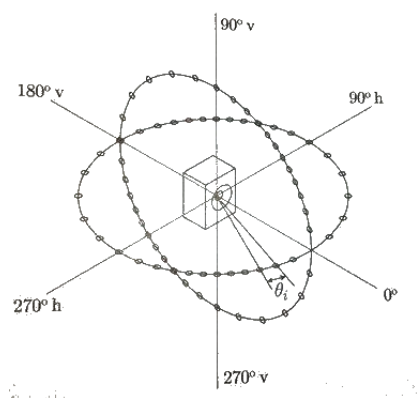


Figura 2.14: Pontos de medição da diretividade tanto em elevação  $\phi$  como em azimuth  $\theta$  de um altifalante [21]

O diagrama de diretividade consiste assim, numa representação gráfica planar da distribuição de valores da magnitude da pressão sonora da resposta do transdutor para cada frequência e a sua escala poderá ser linear ou logarítmica. O seu valor de referência é normalmente o obtido na direção do eixo principal do transdutor. Na figura 2.15 pode observar-se a representação de um diagrama de diretividade de um microfone cardióide (Shure SM58).

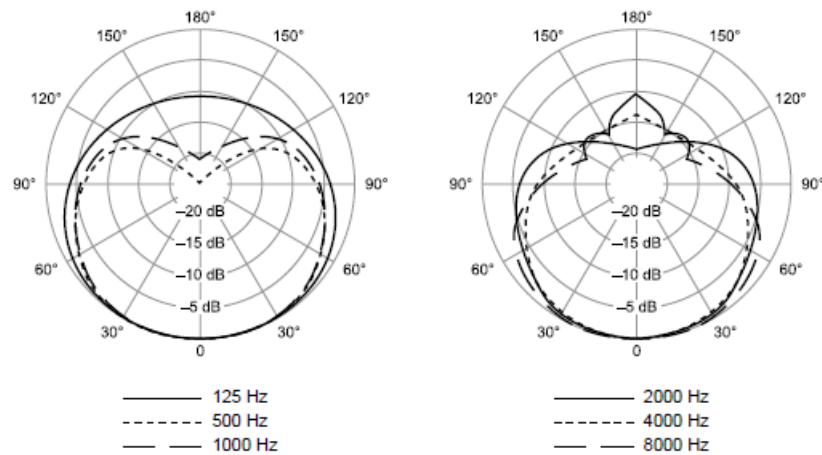


Figura 2.15: Diagrama de diretividade de um microfone cardióide (Shure SM58) [22]

### 2.6.1.1 Fator e índice de diretividade

O diagrama de diretividade é, em certos casos, insuficiente quando é pretendido conhecer a potência radiada para poder calcular o reforço sonoro necessário. Assim, torna-se essencial o uso de funções que caracterizem a diretividade. Desta forma, introduz-se o fator de diretividade, que extrai do diagrama de diretividade um só valor numérico por frequência. O fator de diretividade  $Q$ , na direção  $(\theta_0, \phi_0)$  é definido como a relação entre a intensidade acústica que a fonte emite nessa direção e a intensidade que seria produzida por uma fonte isotrópica que radiasse uma potência igual à da fonte em estudo:

$$Q(\theta_0, \phi_0) = \frac{I(\theta_0, \phi_0)}{I_{iso}} \quad (2.11)$$

A intensidade isotrópica ( $I_{iso}$ ) define-se como o quociente entre a potência emitida ( $W$ ) e a superfície de uma esfera de raio  $r$  em torno da fonte:

$$I_{iso} = \frac{W}{4\pi \cdot r^2} \quad (2.12)$$

O índice de diretividade,  $DI$ , é definido como a versão do fator de diretividade  $Q$ , em decibel:

$$DI = 10\log(Q) \quad (2.13)$$

Dado o índice de diretividade  $DI(\theta)$  e conhecida a potência radiada pela fonte  $W$ , é possível calcular a intensidade em qualquer direção do espaço, à distância  $r$  na forma logarítmica, a partir da expressão 2.14 [21]:

$$L_I(\theta, r) = 10\log\left(1.10^{12} \frac{W}{4\pi \cdot r^2}\right) + 10\log\left(\frac{I_0}{I_{iso}}\right) + 10\log\left(\frac{p^2(\theta)}{p_0^2}\right) \quad (2.14)$$

## 2.6.2 Projeto de Sistemas Eletroacústicos

Para desenhar um sistema de reforço eletroacústico é necessário definir alguns critérios de dimensionamento do sistema de forma a cumprir as especificações de qualidade pretendidas para o projeto e, assim, eleger o nível de pressão sonora para o reforço.

Antes de avançar para a exposição dos passos a seguir para o desenho de um reforço sonoro, é essencial perceber de que forma é que o som direto e o som reverberante se distribuem numa sala. O som direto é o som que chega ao ouvinte pelo caminho mais curto sem sofrer reflexões, tendo por isso um decaimento de 6 dB por cada duplicação da distância. O som reverberante é aquele que chega ao ouvinte após várias reflexões verificando-se que o nível do campo reverberante se distribui uniformemente em média sendo independente do ponto de observação. Os conceitos de campo direto e campo reverberado estão por isso explicados em mais detalhe no capítulo 2.3.

O reforço sonoro pode ser desenhado atendendo à inteligibilidade da palavra ou atendendo ao nível sonoro. Os desenhos baseados na inteligibilidade da palavra devem aplicar-se quando o seu propósito se destina ao uso da mesma. Assim, para que se obtenha o entendimento necessário são muitas vezes impostos níveis mínimos. Em geral pode-se dizer que a inteligibilidade da palavra num espaço depende de dois fatores: a relação sinal-ruído e o tempo de reverberação. Quanto maior for a relação sinal-ruído e menor o tempo de reverberação, maior será a inteligibilidade. Os desenhos baseados no nível consideram limites mínimos e máximos absolutos de pressão sonora para o reforço. O limite superior é determinado pela realimentação, que é produzida quando o sinal emitido pelo altifalante é captado pelo microfone, de novo amplificado e emitido repetidamente. Este fenómeno traz como consequência o efeito Larsen que consiste na emissão indesejada de um som de nível elevado que pode danificar os equipamentos e causar a falha do sistema de reforço sonoro assim como causa perda de inteligibilidade e incomodidade nos ouvintes. O limite inferior é determinado pelo ruído de fundo existente no espaço.

Agrupando os dois critérios, para que seja produzida uma comunicação compreensível na posição do ouvinte devem considerar-se quatro aspetos [21]:

1. O nível de pressão sonora deve ser pelo menos 25 dB superior ao nível de ruído de fundo às frequências médias (zona frequencial da palavra);
2. As características espectrais da mensagem sonora não devem modificar-se no percurso até ao ouvinte, assim, o espectro do som que é recebido deve aproximar-se do que é produzido pela fonte;

3. A relação entre o som direto e o som reverberante deve ser elevada para que não haja redução de inteligibilidade;
4. A diferença temporal entre o som que chega pelo reforço sonoro e som direto deve ser inferior a 30-50 ms se for desejado que ambos os sinais sejam entendidos como um só e de maior nível (efeito Haas).

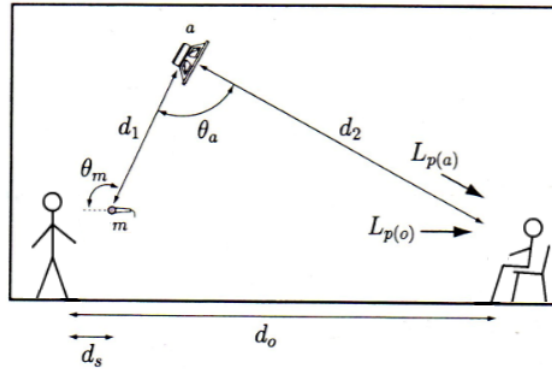


Figura 2.16: Geometria de um reforço sonoro simples (Adaptado de [21])

Na figura 2.16 é apresentada a geometria básica de um reforço sonoro com um só microfone e um só altifalante. O orador produz uma determinada pressão acústica sobre o microfone  $m$  que se encontra  $d_s$  metros afastado de si. O orador está a  $d_o$  metros do ouvinte, o microfone a  $d_1$  metros do altifalante e o altifalante a  $d_2$  metros do ouvinte.  $L_{p(a)}$  e  $L_{p(o)}$  representam, respetivamente, o nível sonoro produzido pelo altifalante no lugar do ouvinte e pelo orador no mesmo local. A partir desta representação é possível derivar as variáveis necessárias para o desenho de um reforço sonoro atendendo aos níveis de pressão sonora [23].

### Distância Acústica Equivalente

Pretende-se agora determinar qual a distância física máxima de separação entre o orador e ouvinte para a qual seja possível ouvir o orador sem recurso a reforço eletroacústico. Para tal, consideram-se as condições presentes na figura 2.16. Considera-se ainda que um orador típico produz uma pressão sonora com um nível de 65 dB a 1 m de distância [21]. Para um nível de ruído de fundo ( $RF$ ) de 28 dB, e respeitando a relação sinal-ruído ( $SNR$ ) mínima de 25 dB, o nível de pressão sonora produzida pelo orador terá de ser pelo menos  $28+25=53$  dB, ou seja, 12 dB abaixo do nível disponível. Assim, o valor limite da distância física máxima entre o orador e o ouvinte para estas condições, em que se admite que se manterá uma compreensão clara, será aquele para o qual a pressão sonora recebida é de 53 dB:

$$d = 10^{\frac{L_{p(o)}(1m) - (RF + SNR)}{20}} = 10^{\frac{65 - (28 + 25)}{20}} = 4m \quad (2.15)$$

o que resulta em 4 metros.

Esta distância máxima entre o orador e o ouvinte sem reforço sonoro é uma referência para comprovar o funcionamento do sistema de som.

Quando uma mensagem é emitida por um orador sem auxílio de reforço sonoro, em campo livre, a uma distância  $d_o$  do ouvinte, o mesmo situa esse orador mentalmente a uma determinada distância que coincide com a distância real a que ele se encontra. Utilizando o sistema sonoro o ouvinte recebe um nível alterado que lhe faz parecer que o orador se situa mais próximo sem que na realidade isso aconteça. Assim, define-se como *distância acústica equivalente*, EAD, a distância subjetiva à qual o ouvinte situa o orador quando existe reforço sonoro. O fenómeno agora descrito está representado na figura 2.17.

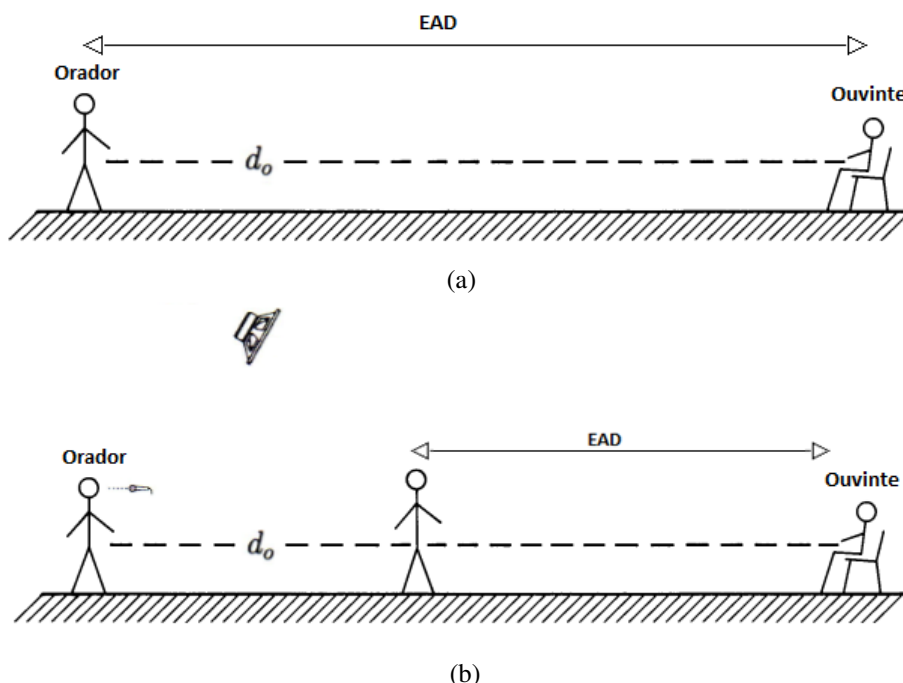


Figura 2.17: Distância acústica equivalente: (a) sem reforço sonoro; (b) com reforço sonoro.

Descrito o fenómeno, é agora possível definir as relações expostas. A partir do nível que é produzido pelo orador, que se admite ser em média 65 dB a 1 m de distância, o valor do nível produzido pelo orador a  $d_o$  metros será:

$$L_{p(o)} = L_{p(o)}(1m) - 20\log d_o = 65 - 20\log d_o \text{ dB} \quad (2.16)$$

Ativando o sistema de reforço sonoro, o ouvinte perceberá um nível de pressão acústica superior à originada apenas pelo orador. Pela mesma linha de pensamento teremos:

$$L_{p(a)} = L_{p(a)}(1m) - 20\log d_2 = L_{p(o)}(1m) - 20\log EAD = 65 - 20\log EAD \text{ dB} \quad (2.17)$$

sendo daqui possível extraír EAD, em metros:

$$EAD = 10^{\frac{65-L_{p(a)}}{20}} \quad (2.18)$$

Da expressão anterior pode-se deduzir que, se EAD for grande, então o reforço sonoro é deficiente e o ouvinte situa o orador longe de si.

Tendo em conta que o ruído de fundo estabelece o nível mínimo de pressão no local, e que o reforço sonoro deve ser superior a esse nível em pelo menos 25 dB, então:

$$L_{p(a)} \geq RF + 25 \text{ dB} \quad (2.19)$$

Assim, determina-se que a distância acústica equivalente máxima será de :

$$EAD \leq 10^{\frac{65-25-RF}{20}}, \quad EAD_{max} = 10^{\frac{40-RF}{20}} \quad (2.20)$$

### Ganho Acústico

O ganho acústico é definido como o aumento de nível que é produzido pelo reforço sonoro, ou seja, é a diferença entre os níveis que chegarão à audiência com e sem o sistema de reforço sonoro. Assim, é possível definir o ganho acústico a partir da equação 2.21, tendo como referência a posição dos elementos envolvidos no reforço sonoro da figura 2.16.

$$AG = L_{p(a)}(d_2) - L_{p(o)}(d_o) \quad (2.21)$$

Na figura 2.18 observa-se um sistema de reforço sonoro típico em que os transdutores possuem também uma determinada diretividade. Porém, vamos inicialmente considerar que são omnidirecionais. Neste caso, e recorrendo à equação 2.16, considerando que o nível produzido pelo orador a 1 m se mantém em 65 dB, então o nível que será produzido pelo orador no ouvinte será reduzido devido às perdas causadas pela distância e o seu valor será  $65-20\log(7)=48\text{dB}$ .

Ligando o sistema de reforço sonoro e fazendo aumentar o ganho até este atingir o limite de realimentação que ocorre quando o altifalante produz sobre o microfone uma pressão igual à do orador, sendo neste caso 65 dB, torna-se possível determinar o ganho máximo que se pode obter sem prejudicar o projeto. Assim, se o altifalante produz 65 dB no microfone que está a 4m, sabe-se que o altifalante terá que produzir a 1 m o nível de  $65+20\log(4)$ . Sabe-se ainda que o nível que chega ao ouvinte a partir do altifalante será de  $65+20\log(4)-20\log(6)$ , o que é equivalente a fazer  $65-20\log(6/4)=61,5 \text{ dB}$ . Assim, sem a existência de margem de segurança, fica determinado o ganho do sistema, que será de  $61,5-48=13,5\text{dB}$ .

Desta forma é possível exprimir o ganho acústico como:

$$AG = 65 - 20\log\frac{d_2}{d_1} - \left(65 - 20\log\frac{d_o}{d_s}\right) \quad (2.22)$$

Simplificando e exprimindo em função de EAD obtém-se:

$$AG = 20\log\frac{d_o.d_1}{d_s.d_2} = 20\log\frac{d_o}{EAD} \quad (2.23)$$

Na realidade é necessário considerar fatores de diretividade tanto do microfone como do altifalante. Considerando um microfone cardióide, que recebe a pressão do altifalante a  $90^\circ$  e sabendo que para este tipo de microfone o índice de diretividade máximo é dado por  $0,5(1+\cos\theta)$ , então a saída irá valer  $20\log[0,5(1+\cos90^\circ)] = -6\text{dB}$ , que permitem aumentar o ganho acústico ou a margem de estabilidade.

Da mesma forma, considerando a diretividade do altifalante, e supondo que para um ângulo de  $75^\circ$  obtém-se uma pressão 10 dB inferior à do eixo, então é possível obter o novo ganho acústico entrando em consideração a diretividade dos elementos presentes. Assim, este é dado por  $13,5+16=29,5\text{ dB}$ , que permite produzir no ouvinte uma pressão de  $48+29,5=77,5\text{ dB}$ .

Resumindo, o ganho acústico passa a ser determinado por:

$$AG = 20\log\frac{d_o.d_1}{d_s.d_2} - D_a(\theta_a) - D_m(\theta_m) \quad (2.24)$$

onde  $D_a$  e  $D_m$  representam as diretividades do altifalante e microfone, respetivamente.

No entanto, na realidade será desejável reservar alguma margem de estabilidade (6 dB) pelo que o valor do ganho acústico máximo é dado por :

$$AG_{max} = 20\log\frac{d_o.d_1}{d_s.d_2} - D_a(\theta_a) - D_m(\theta_m) - 6\text{ dB} \quad (2.25)$$

E o ganho acústico mínimo é dado por:

$$AG_{min} = 20\log d_o - 20\log EAD_{max} \quad (2.26)$$



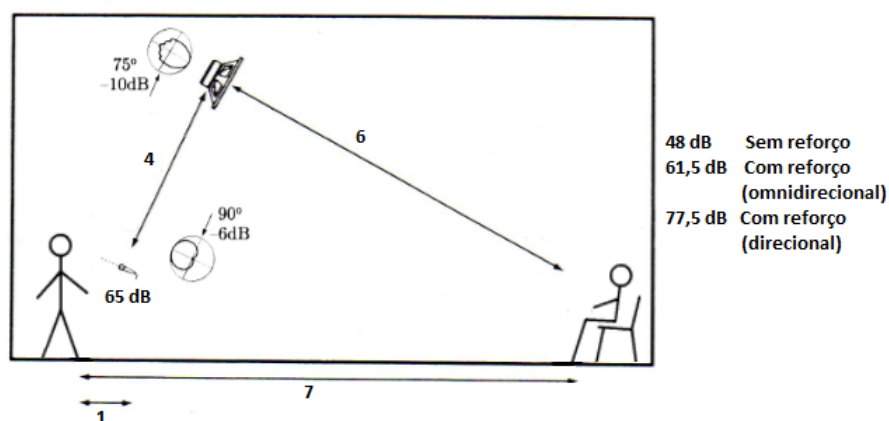


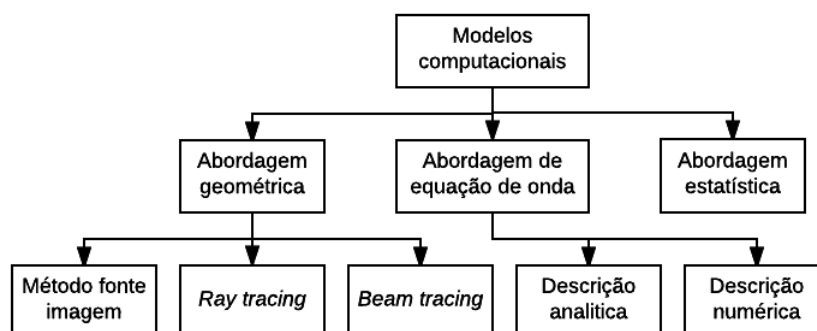
Figura 2.18: Sistema de reforço eletroacústico com altifalante e microfone direcionais (Adaptado de [21])

Desta forma pode dimensionar-se o sistema de reforço sonoro para satisfazer a estabilidade e ao mesmo tempo a necessidade de pressão acústica no ouvinte.

## 2.7 Tecnologias e Ferramentas para o Desenho Acústico

Como é usual em ramos de engenharia que lidam com a compreensão e predição de fenómenos físicos complexos, a modelação tornou-se rapidamente uma parte integral do processo de desenho acústico. Ao lidar com espaços fechados, o uso de modelos apropriados permite determinar as consequências da alteração de materiais ou forma do espaço em parâmetros como o tempo de reverberação, pressão sonora e outros [12]. Torna-se assim possível, a partir de um modelo computacional, simular com alguma facilidade alterações no espaço com o intuito de perceber o seu impacto e se efetivamente melhoram a acústica da sala.

Os modelos computacionais estão divididos em três abordagens. As mesmas estão representadas no seguinte fluxograma:



No âmbito desta dissertação torna-se importante conhecer as várias ferramentas existentes no mercado que permitem auxiliar o desenho acústico. Entre os *softwares* existentes são de referir os seguintes: Olive Tree Lab-Room, ODEON, CATT, EASE e EASERA. Tendo em conta que

o *software* com maior relevo neste trabalho é o EASE, será feito de seguida um estudo mais aprofundado sobre o seu método de funcionamento.

O EASE utiliza o método *ray tracing* para fazer os cálculos necessários, enquadrando-se numa abordagem geométrica. Desta forma, é essencial que o primeiro passo a dar ao utilizar o EASE seja a construção correta do modelo arquitetural do espaço a estudar. Este passo é crucial porque é a fundação de todo o trabalho que se irá desenvolver a partir daí. Posteriormente, será importante atribuir os materiais, fontes sonoras e áreas ou locais onde se pretende fazer o estudo acústico. Concluída esta parte, estamos capazes de avançar para o cálculo dos parâmetros acústicos, utilizando o já referido método de *ray tracing*.

O método de *ray tracing* consiste na emissão pela fonte de um conjunto finito de raios representando as ondas sonoras. Este método cria um ambiente virtual em que os raios emitidos pela fonte podem ser vistos a viajar em linha reta até alcançarem um ouvinte virtual. São assim tidos em conta fatores como a reflexão das ondas sonoras com a envolvente, a absorção dos materiais nos quais os raios incidem e a adição das várias chegadas de raios no ponto de medição. É assim possível obter o refletograma a partir do tempo de viagem e localização do raio.

Uma funcionalidade importante nestes *softwares* é a auralização. Esta é definida como o processo de produzir de forma virtual o campo sonoro de uma fonte num espaço, de modo a simular uma sensação binaural numa posição do espaço modelado. Este processo começa com a obtenção dos refletogramas, representando a resposta impulsional do modelo, obtidos numa localização específica de receção para várias frequências. Os refletogramas são posteriormente convoluídos com uma gravação monaural de fala ou música captados em ambiente anecóico. Os resultados podem ser reproduzidos dentro de certas condições utilizando fones ou altifalantes, com o objetivo de demonstração e de avaliação subjetiva do espaço.

## Capítulo 3

# Metodologia de Estudo, Avaliação e Desenho Acústico de Espaços de Aula

O problema em análise nesta dissertação centra-se em avaliar a qualidade acústica de um espaço. Assim, dada uma sala, o objetivo será torná-la adequada à finalidade da comunicação acústica. Poderá ser para música, palavra ou mista, mas, no caso em análise será feita uma adaptação das suas características para o uso da palavra, uma vez que será essa a principal finalidade do espaço escolhido.

Como ponto de partida para a caracterização do problema, será essencial compreender e dominar tecnicamente os fenómenos associados à propagação sonora numa sala para assim poder verdadeiramente perceber o seu comportamento. É importante estudar os principais fenómenos, nomeadamente, a divergência sonora da fonte, a reflexão, a refração, a difração, a difusão, a absorção sonora e ainda as ressonâncias da sala e de cavidades, tal como foi apresentado anteriormente.

Para adaptar uma sala à sua finalidade, será então necessário obter valores para os parâmetros acústicos descritivos do espaço. Suceder-se-á a sua avaliação, para o que será importante definir as características desejadas para os mesmos, tal como foi estudado no capítulo anterior (tempo de reverberação, RASTI e outros) e ter em conta a sua distribuição na sala, tendo em mente que esta não é uniforme. Com esse intuito, é aconselhado o estudo das normas existentes e dos valores recomendados para os diversos parâmetros para assim determinar os valores ideais que se pretendem alcançar, sendo estes, nesta dissertação, escolhidos para efeito da palavra.

### 3.1 Legislação e Valores Recomendados

Fazendo um estudo da legislação existente em diversos países da Europa e nos EUA relativamente ao tempo de reverberação, constata-se que já são poucos os países que calculam o valor limite para o  $T_r$  adequado a um espaço com recurso ao volume do mesmo. No entanto, este não é o caso de Portugal. O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios aprovado pelo DL

96/2008 recomenda a fórmula 3.1 para o cálculo do  $Tr[500-2kHz]$  recomendado em auditórios para fins de oratória, e utiliza a fórmula 3.2 para o idêntico cálculo em espaços de aula [24].

$$\begin{aligned} T &\leq 0,12V^{\frac{1}{3}}(s) && , \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \\ T &\leq 0,32 + 0,17\log V(s) && , \text{ se } 250 \leq V < 9000 \text{ m}^3 \\ T &\leq 0,05V^{\frac{1}{3}}(s) && , \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$T \leq 0,15V^{\frac{1}{3}}(s) \quad (3.2)$$

Para o tipo de espaço em estudo mobilado, em Espanha recomendam-se valores máximos de  $Tr[500-2kHz]$  de 0,5 s para um volume do espaço inferior a  $350 \text{ m}^3$ . Em França a legislação apresenta valores aceitáveis de  $Tr[500-2kHz]$  entre 0,4 s e 0,8 s para espaços com volume inferior ou igual a  $250 \text{ m}^3$ , e o intervalo de 0,6 s a 1,2 s para volumes superiores a  $250 \text{ m}^3$ . Na Suécia, o  $Tr_{maximo}[250-4kHz]$  recomendado é de 0,6 s e em Inglaterra o  $Tr_{maximo}[500-2kHz]$  é de 0,8 s [25]. O regulamento dos EUA, para espaço de aula com volume inferior a  $283 \text{ m}^3$  recomenda valores de  $Tr_{maximo}[500-2kHz]$  de 0,6s, e de 0,7s para volumes superiores a  $283 \text{ m}^3$  e inferiores a  $566 \text{ m}^3$  [26]. Na literatura encontram-se ainda valores recomendados de  $Tr$  para auditórios (palavra) de 0,7-0,8 s para frequências de 500-1kHz [1].

Relativamente ao RASTI, e observando a tabela 2.1, sabe-se que para obter uma inteligibilidade avaliada como boa, é recomendado o valor mínimo de 0,6 para este parâmetro.

Relativamente aos parâmetros  $C_{50}$  e  $D_{50}$ , são recomendados valores superiores a 0 dB para o primeiro, e para o segundo é esperado um valor superior a 0,5 de forma a obter uma inteligibilidade de sílabas superior a 85% [17, 12].

Passando para a análise das recomendações relativas ao ruído de fundo, para um espaço de aulas ideal, o valor máximo aceitável é de 40dBA [17].

Finalmente, neste breve estudo relativo aos valores aceitáveis para uma boa acústica de um espaço, considera-se ainda importante analisar a resposta impulsional do mesmo para perceber se existem reflexões tardias de grande intensidade, que são prejudiciais para uma boa comunicação acústica.

Poderá desta forma completar-se a primeira parte das exigências acústicas a colocar no desenho da sala. Será ainda necessário considerar os aspetos de uniformidade de cobertura sonora do espaço.

### 3.2 Avaliação do Espaço por Simulação e Experimentação

Terminada a fase de determinação dos valores desejados, será necessário passar à fase de avaliação do espaço recorrendo se possível à simulação e à experimentação.

Relativamente à experimentação, esta consiste numa avaliação *in loco* do espaço estudado, adquirindo valores dos parâmetros descritivos do espaço tais como,  $Tr$ , RASTI,  $C_{50}$  e outros.

Como forma alternativa de avaliar o espaço, ou para termo de comparação com a avaliação experimental, surge a simulação acústica do espaço recorrendo a ferramentas específicas. A utilização de um *software* de simulação acústica de um espaço torna-se vantajosa porque serve não só como suporte para desenho acústico de raiz, mas também como suporte para desenho corretivo. O primeiro é usado quando o espaço ainda está em construção e o segundo quando o espaço já construído deve ser avaliado e se quer eventualmente aplicar melhorias acústicas.

A utilização deste modelo traz algumas exigências ao nível de conhecimento das características dos materiais e mobiliário utilizados porque necessita da atribuição de um coeficiente de absorção a cada material e em função da frequência. Só assim é possível obter um modelo que simule com precisão os eventos sonoros ocorridos no espaço real.

Não só é importante considerar os materiais da envolvente e mobiliário do espaço no modelo, como também se este é ocupado por pessoas. Esta ocupação tem consequências nos valores obtidos para o tempo de reverberação porque é sabido que o corpo humano apresenta características de elemento absorvente das ondas sonoras. Além disto, a possível ocupação do espaço tem também influência no ruído de fundo uma vez que, naturalmente, o ser humano ao realizar atividades produz ruído. O ruído produzido pelo manuseamento de material escolar e movimentações, nomeadamente, numa situação de espaço de aulas, produz um efeito negativo no ambiente geral do espaço, relativamente à sua utilização para comunicação da palavra.

De forma a simular a influência dos materiais e a presença de pessoas num espaço é sugerida a realização de testes tipo em câmara reverberante. Para obter valores para os coeficientes de absorção das pessoas e do material pode medir-se o tempo de reverberação da câmara preenchida com o material alvo do estudo e usar a diferença entre este valor e o valor para a câmara vazia. Assim, para determinar a influência das pessoas num espaço, mede-se o tempo de reverberação na câmara com e sem pessoas, e posteriormente, para a obtenção do coeficiente de absorção utiliza-se a fórmula 2.4. Da mesma forma, podem obter-se os coeficientes de absorção para os diferentes materiais presentes no espaço em análise. Para perceber o efeito do ruído de fundo no espaço de aulas é também possível em câmara reverberante realizar diversas atividades praticadas normalmente pelos estudantes, assim como manusear material, sussurar e movimentar-se na cadeira, e fazer a medição do ruído produzido para depois obter valores tipo a introduzir no modelo de simulação, tornando-o assim mais realista. Os valores obtidos a partir desta avaliação do espaço serão confrontados com os valores desejados. Desta avaliação surge uma eventual necessidade de intervenção, o que implica a criação de soluções para mudar os valores dos parâmetros acústicos de maneira a obter os desejados.

### 3.3 Soluções e Confirmação Experimental

Esta intervenção poderá ser feita com recurso a dispositivos acústicos pontuais, poderá ser uma intervenção global utilizando superfícies e revestimentos para o efeito e ainda poderá ser utilizado reforço sonoro recorrendo a altifalantes.

Após estes passos será importante obter uma confirmação experimental objetiva e subjetiva para concluir se foram obtidos os valores desejados para os indicadores acústicos e, desta forma, verificar o cumprimento do objetivo de criar um espaço acústico bem adaptado à sua finalidade.

### 3.4 Metodologias Propostas

Para poder solucionar possíveis problemas acústicos de espaços de aula, é importante definir os passos a seguir para identificar o problema e, com base nos resultados obtidos, solucioná-lo. Assim, após a reflexão feita anteriormente, torna-se possível propor uma metodologia para o desenho acústico de correção, estando esta presente na figura 3.1a. Será esta a metodologia aconselhada a seguir para o desenho acústico de espaços de aula já construídos. É ainda apresentada a metodologia proposta para desenho acústico de raiz na figura 3.1b.

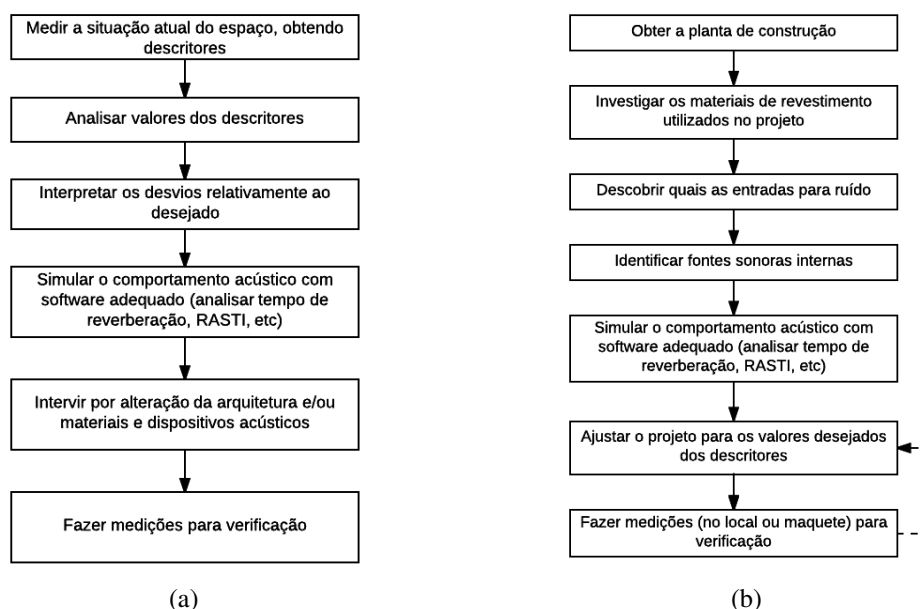


Figura 3.1: Metodologia proposta para: (a) desenho corretivo; (b) desenho de raiz

A segunda metodologia apresentada referente ao desenho acústico de raiz é utilizada quando o espaço ainda se encontra na fase de projeto e se pretende considerar os aspetos acústicos do mesmo. Assim, utiliza-se um software de simulação que pretende prever o comportamento do espaço e ajustar o projeto para os valores desejados dos descritores. Desta forma, é possível adaptá-lo o melhor possível à sua finalidade numa fase anterior à construção.

## Capítulo 4

# Caso de Estudo: Anfiteatro B013 (FEUP)

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto é uma faculdade conceituada na Europa, sendo frequentada diariamente por milhares de alunos e professores. Tendo em conta a intensa ocupação do espaço em atividades letivas, é de esperar que este esteja adaptado, o melhor possível, às suas necessidades. No entanto, sabe-se que a nível acústico, tal ainda não acontece. Já foram feitos vários estudos em diversas salas da FEUP e provou-se que, salvo num caso já interencionado, não são encontrados valores para os parâmetros acústicos dentro da gama adequada [27, 28]. Este facto apresenta prováveis consequências negativas na aprendizagem dos estudantes e no bem estar dos professores, que necessitam de fazer um esforço maior do que o desejável para ouvir bem e serem ouvidos.

Após uma breve análise sobre os vários tipos de sala existentes na FEUP e a sua qualidade acústica, adiante apresentada no anexo A, foi escolhido o anfiteatro B013 (semelhante ao anfiteatro B023) da figura 4.1 para fazer um estudo mais aprofundado, uma vez que este tipo de espaço é um dos mais abundantes, com um total de 13 salas ao longo da faculdade e um dos mais frequentados pelos estudantes, tendo uma lotação de 98 lugares. Foi escolhido este auditório em específico porque é um dos deste tipo que está situado perto da autoestrada, pelo que é um dos casos mais desfavoráveis. Excluiu-se desta seleção o anfiteatro B032 uma vez que este já foi submetido a tratamento acústico exemplificativo noutra missão e com objetivos diferentes.



Figura 4.1: Anfiteatro B013

Neste capítulo são apresentados os valores obtidos para os vários parâmetros acústicos medidos no anfiteatro B013, resultados para um ensaio realizado em câmara reverberante para avaliar o impacto da presença de pessoas e materiais no espaço, e é feita uma simulação acústica do mesmo com o *software* EASE.

## 4.1 Avaliação Acústica

A avaliação acústica consiste numa recolha de dados *in loco* dos parâmetros acústicos descritivos de um espaço. Para o anfiteatro B013 os parâmetros medidos, e que foram considerados importantes, tendo em conta que o espaço tem como finalidade a palavra, foram o tempo de reverberação, o RASTI, a definição e a claridade, e ainda, o ruído de fundo. Foi ainda obtida a resposta impulsional do espaço em dois pontos distintos de receção e um ponto de emissão.

De seguida, serão apresentados os equipamentos, os métodos e pontos de medição utilizados para a recolha de dados no espaço, e ainda, os resultados obtidos e a sua análise comparada com o que seria adequado obter.

É também relevante para este estudo conhecer as características morfológicas do anfiteatro, bem como das superfícies envolventes. O espaço tem um volume aproximado de  $363\text{ m}^3$  com 11 filas, sendo cada uma composta por 9 lugares, excepto a última que tem apenas 8, perfazendo um total de 98 lugares. A sala é constituída por cadeiras com assentos rebatíveis e mesas, como se pode observar na figura 4.1, sendo os assentos feitos de madeira compensada e as mesas de contraplacado. Estes elementos estão apoiados em pilares de metal.

Relativamente à base do piso, esta é constituída por linóleo, as paredes constituídas por tijolo rebocado e o teto de gesso cartonado liso. O teto é falso sendo que o de maior dimensão dista até ao teto de betão entre 56 cm e 87 cm. A sala tem várias janelas de vidro duplas para o exterior, um projetor colocado na zona central do teto de maior dimensão e uma mesa e cadeira reservadas para o orador. Estas estão colocadas no espaço de produção da palavra na zona frontal da sala, que possui também um quadro branco. O espaço destinado ao orador apresenta um teto de menores dimensões, que à semelhança do outro também é falso. Este apresenta uma distância de 50 cm até ao teto de betão, e apresenta algumas condutas neste espaço.

### 4.1.1 Instrumentação

Esta secção serve para apresentação do equipamento utilizado na aquisição de dados para a avaliação acústica. Foram utilizados diversos equipamentos para vários objetivos e métodos de medição expostos a seguir.

Foi utilizado um emissor acústico (fonte sonora controlada) Brüel & Kjær 4224 [29] (figura 4.2) e o sonómetro 2260 da Brüel & Kjær [30] (figura 4.3) no seu tripé.

Foi concomitantemente utilizada uma cadeia avulso de medição composta por dois microfones omnidirecionais de medição Brüel & Kjær, modelos 4190 [31] e 4135 [32] (figura 4.4a), nos seus





Figura 4.2: Emissor Brüel & Kjær 4224



Figura 4.3: Sonómetro Brüel & Kjær 2260

tripés, com a fonte de alimentação Brüel & Kjær 2804 [33] (figura 4.4b), um pré-amplificador bi-canal SPL ProMike [34] (figura 4.4c), uma placa de interface de som Edirol UA-101 [35] (figura 4.4d) e um computador pessoal.



(a) Microfones 4190 ou 4135 da Brüel & Kjær



(b) Fonte de alimentação 2804 da Brüel & Kjær



(c) Pré-amplificador SPL ProMike



(d) Placa de interface de som Edirol UA-101

Figura 4.4: Equipamentos utilizados na cadeia de medição

A ilustração das ligações desta cadeia está apresentada na figura 4.5. O desenho desta cadeia foi orientado para permitir a aquisição das formas de onda sonoras produzidas nos ensaios acústicos com a máxima qualidade técnica possível. Destas formas de onda pretendem-se obter medições alternativas dos parâmetros acústicos de interesse assim como outras descrições como as respostas impulsionais com vários tipos de excitação e as formas de onda do ruído. Com a

principal finalidade do treino especializado da outora desta dissertação, o método concomitante de caracterização acústica alcançado desta forma permitiu confirmar os valores obtidos a partir do equipamento tradicional e da simulação computacional.

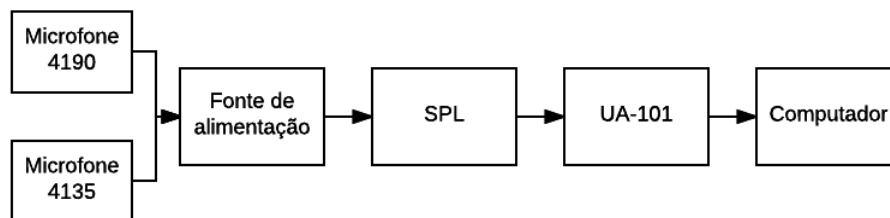


Figura 4.5: Cadeia de medição com microfones

Foi utilizada uma segunda fonte sonora constituída por um altifalante HS 80M da Yamaha [36], que se pode observar na figura 4.6.



Figura 4.6: Fonte sonora Yamaha HS 80M

Para efeitos de medição de RASTI foram ainda utilizados um emissor Brüel & Kjær 4225 e um recetor Brüel & Kjær 4419 presentes, respetivamente, nas figuras 4.7 e 4.8 .



Figura 4.7: Emissor Brüel & Kjær 4225



Figura 4.8: Recetor Brüel & Kjær 4419

### 4.1.2 Tempo de Reverberação

#### 4.1.2.1 Método e Pontos de Medição

No dia 7 de Abril de 2017 pelas 16h foi realizado o ensaio do teste de reverberação no anfiteatro B013. Para a obtenção do tempo de reverberação do espaço como mencionado em 4.1.1 foram utilizados dois processos de medição, o primeiro, convencional, recorrendo ao sonómetro, e o segundo utilizando microfones para captar o mesmo som com o *software* Audacity e, posteriormente, procedendo à sua análise com o *software* Matlab.

O primeiro método com recurso à fonte sonora (figura 4.2) e sonómetro (figura 4.3), consiste na utilização da fonte para emitir um sinal de forma a excitar o espaço, sendo o mesmo sinal captado pelo sonómetro que irá fazer os cálculos do tempo de reverberação. Assim, neste ensaio, a fonte sonora foi colocada na zona onde normalmente o professor se encontra, ou seja, no local junto ao quadro. Para esta medição, a fonte emitiu ruído branco com uma amplitude suficientemente alta para se obter uma queda de pelo menos 30dB na sequência da sua desligação, para permitir a medição do tempo de reverberação  $T_{30}$  pelo sonómetro.

O sonómetro foi colocado em três pontos distintos da sala, mais precisamente, nos lugares centrais das filas 2, 6 e 9. Observam-se na planta da sala da figura 4.9 os referidos pontos de medição com a marca *S* a assinalar as posições do sonómetro e *FS* a representar a posição da fonte sonora.

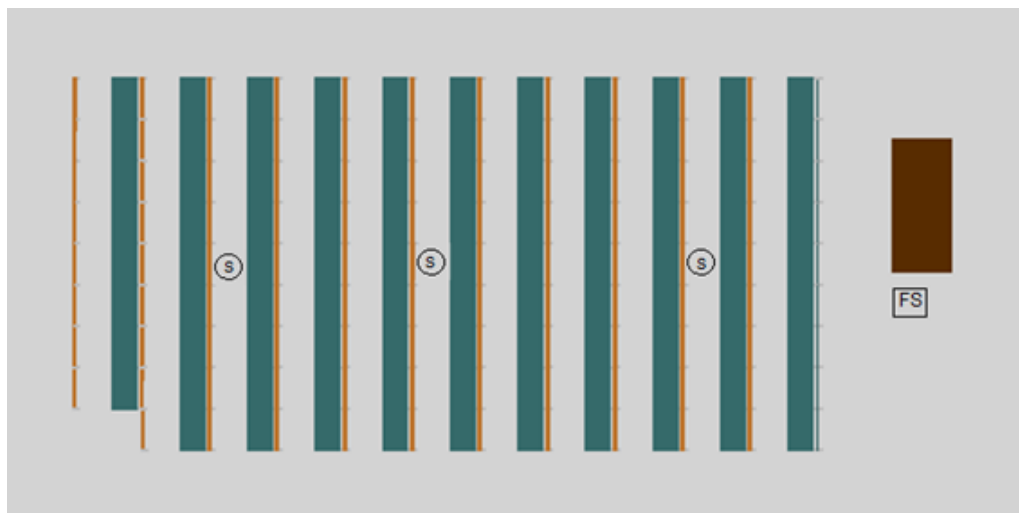


Figura 4.9: Pontos de medição do Tr com o sonómetro

Para o segundo método que foi realizado em simultâneo foi utilizada a cadeia de medição presente na figura 4.5.

Este segundo método consiste na captação do ruído branco produzido pela fonte sonora, à semelhança do processo anterior, no entanto, este sinal foi captado por microfones para posterior análise recorrendo ao *software* Matlab. O processo de cálculo do tempo de reverberação com o *software* Matlab foi estudado e o *script* está apresentado no anexo B.1.

Os pontos de medição foram coincidentes com dois dos pontos do primeiro método, sendo excluído o lugar central da fila 9 pela limitação no número de microfones. A figura 4.10 apresenta os dois pontos medidos, onde a letra *M* representa a posição dos microfones e *FS* representa a fonte sonora.

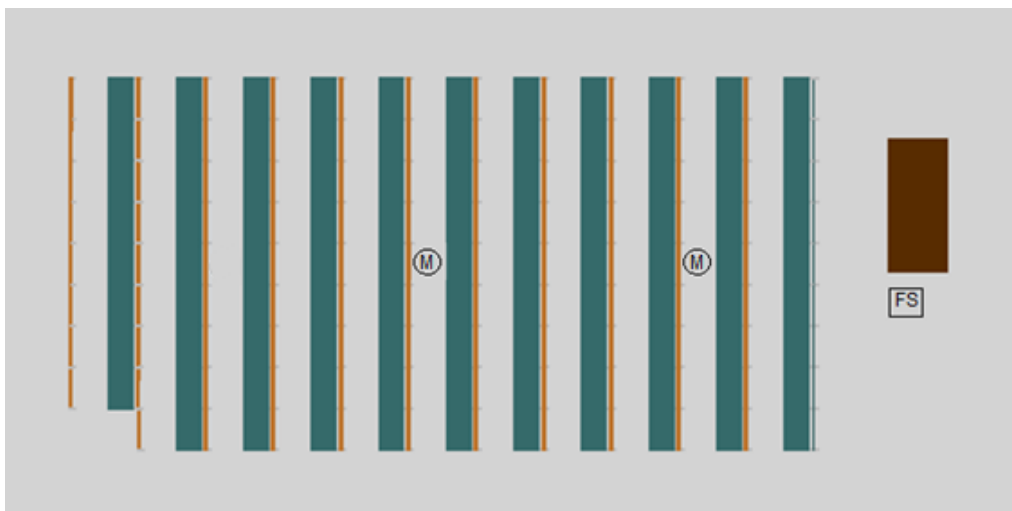


Figura 4.10: Pontos de medição do  $T_r$  com a cadeia de medição

#### 4.1.2.2 Resultados

Os resultados obtidos para o tempo de reverberação, utilizando o sonómetro, para os diferentes pontos de medição, estão apresentados na figura 4.11 e na tabela 4.1 .

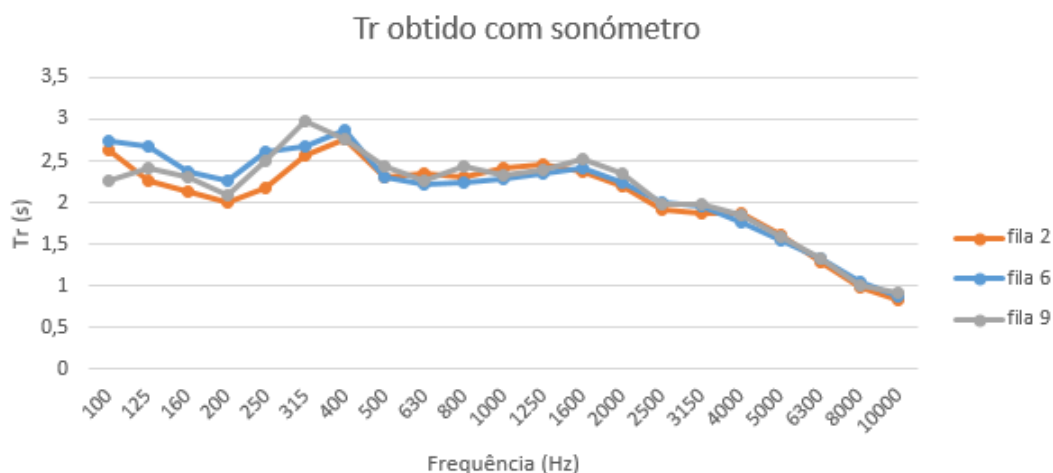


Figura 4.11: Tempo de reverberação na fila 2,6 e 9 com sonómetro

A partir dos resultados obtidos com o sonómetro, conclui-se que o anfiteatro apresenta um tempo de reverberação ( $T_{30}$ ) global de 2,35 s, sendo este cálculo feito a partir da média das frequências das bandas de oitava de 500Hz, 1000Hz e 2000 Hz.

Tabela 4.1: Tempo de reverberação medido no anfiteatro B013 com o sonómetro

Frequência (Hz)	Tr fila 2 (s)	Tr fila 6 (s)	Tr fila 9 (s)	Média (s)
100	2,63	2,74	2,26	2,54
125	2,26	2,67	2,41	2,45
160	2,14	2,36	2,31	2,27
200	2,01	2,26	2,08	2,12
250	2,17	2,61	2,5	2,43
315	2,57	2,67	2,97	2,74
400	2,76	2,86	2,77	2,80
500	2,3	2,31	2,44	2,35
630	2,35	2,22	2,27	2,28
800	2,3	2,24	2,43	2,32
1000	2,41	2,28	2,33	2,34
1250	2,45	2,34	2,39	2,39
1600	2,38	2,41	2,53	2,44
2000	2,2	2,25	2,35	2,27
2500	1,92	2,01	1,97	1,97
3150	1,88	1,95	1,98	1,94
4000	1,86	1,77	1,84	1,82
5000	1,6	1,55	1,58	1,58
6300	1,29	1,32	1,33	1,31
8000	0,98	1,04	1,01	1,01
10000	0,83	0,86	0,92	0,87

A partir do segundo método, ou seja, através de uma captação independente do sinal com os microfones e da sua posterior análise, obtiveram-se os valores presentes na figura 4.12 e na tabela 4.2 para o tempo de reverberação ( $T_{30}$ ).

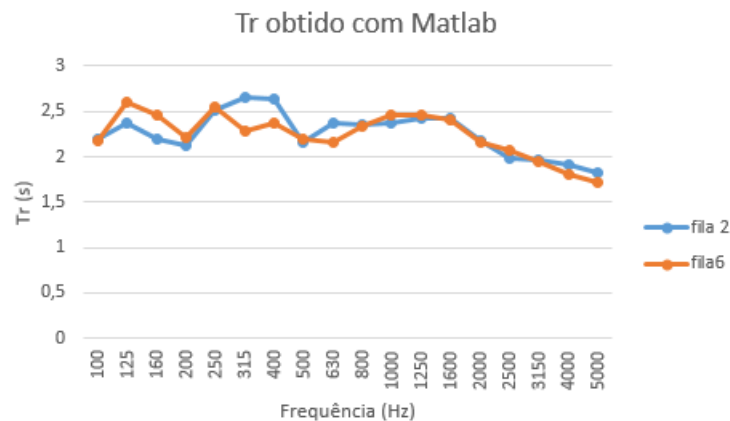


Figura 4.12: Tempo de reverberação na fila 2 e 6 com cadeia de medição

A partir dos resultados obtidos com os microfones, conclui-se que o anfiteatro apresenta um tempo de reverberação global de 2,31 s, utilizando o mesmo método da média das frequências das bandas de oitava de 500, 1000 e 2000 Hz. É ainda possível em Matlab calcular o tempo de reverberação para o sinal total, sem a divisão por sub-bandas, tendo sido obtido o valor de 2,34s

Tabela 4.2: Tempo de reverberação medido no anfiteatro B013 com a cadeia de medição

Frequência (Hz)	Tr fila 2 (s)	Tr fila 6 (s)	Média (s)
100	2,19	2,18	2,19
125	2,37	2,61	2,49
160	2,19	2,46	2,33
200	2,12	2,22	2,17
250	2,52	2,55	2,54
315	2,66	2,28	2,47
400	2,64	2,37	2,51
500	2,16	2,19	2,18
630	2,38	2,16	2,27
800	2,36	2,34	2,35
1000	2,38	2,46	2,42
1250	2,42	2,46	2,44
1600	2,42	2,40	2,41
2000	2,18	2,16	2,17
2500	1,98	2,07	2,03
3150	1,96	1,95	1,96
4000	1,92	1,8	1,86
5000	1,82	1,71	1,77

para a 2ª fila e 2,36s para a 6ª fila. Assim, calculando a média para as duas filas obtém-se um tempo de reverberação global de 2,35 s, coincidente com o valor obtido com o sonómetro.

Na figura 4.13 apresenta-se os traçados de Tr ( $T_{30}$ ) dos dois métodos em sobreposição para uma comparação visual, assim como as diferenças.

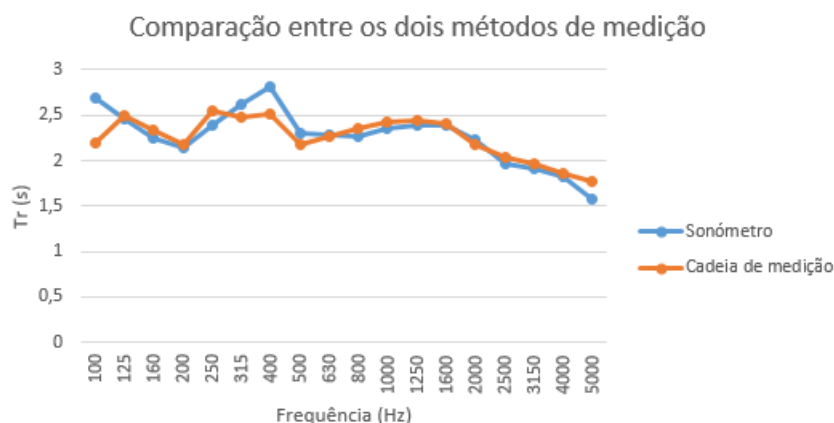


Figura 4.13: Comparação entre os valores obtidos para o tempo de reverberação com os dois métodos utilizados

Como se pode observar, no geral, há uma coerência dos resultados obtidos com os dois métodos, com exceção de dois pontos.

### 4.1.3 RASTI

#### 4.1.3.1 Método e Pontos de Medição

No dia 7 de Abril de 2017, pelas 15h30, foi realizado um ensaio para obtenção do RASTI no anfiteatro B013. Para tal foi utilizado o emissor Brüel & Kjær 4225 da figura 4.7 e o recetor Brüel & Kjær 4419 da figura 4.8. O modo de funcionamento destes aparelhos, e a forma de cálculo do parâmetro em análise, baseia-se no princípio apresentado no capítulo 2.5.

Para a obtenção dos valores de RASTI em várias posições do anfiteatro colocou-se o emissor junto à mesa do professor, como se pode verificar pela figura 4.14 no local assinalado com a letra *E*, e o recetor foi colocado nas diferentes posições identificadas com a letra *R*. Assim, torna-se possível visualizar a variação do valor do parâmetro em estudo em função do local no espaço.

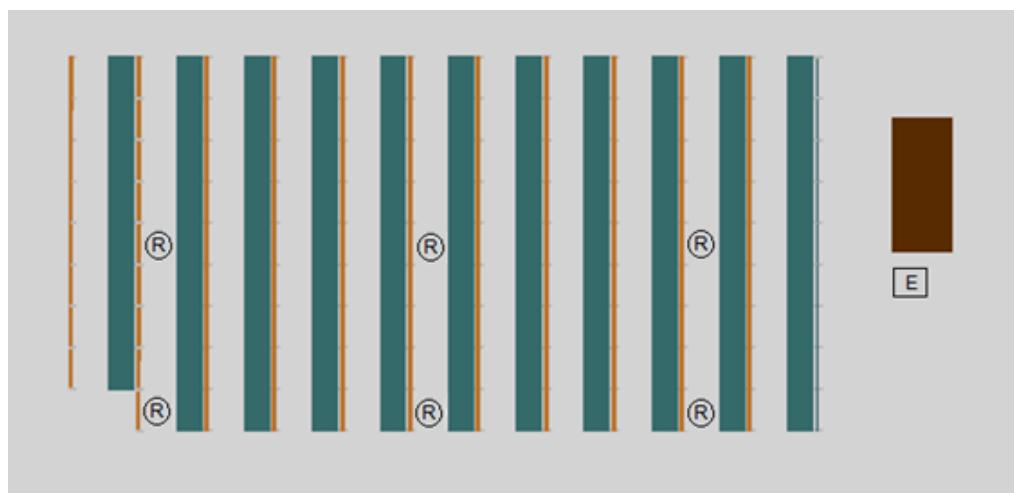


Figura 4.14: Pontos de medição do RASTI

#### 4.1.3.2 Resultados

Os resultados obtidos para o RASTI no anfiteatro B013 estão representados na planta da figura 4.15.

A partir da análise desta figura conclui-se que o espaço estudado apresenta, para os locais medidos, valores de RASTI entre 0,54 e 0,39 e o valor médio de 0,45. Na mesma figura pode ainda observar-se a distribuição da classificação da inteligibilidade da palavra obtida a partir do RASTI ao longo do anfiteatro. Esta classificação foi obtida a partir da tabela 2.1.

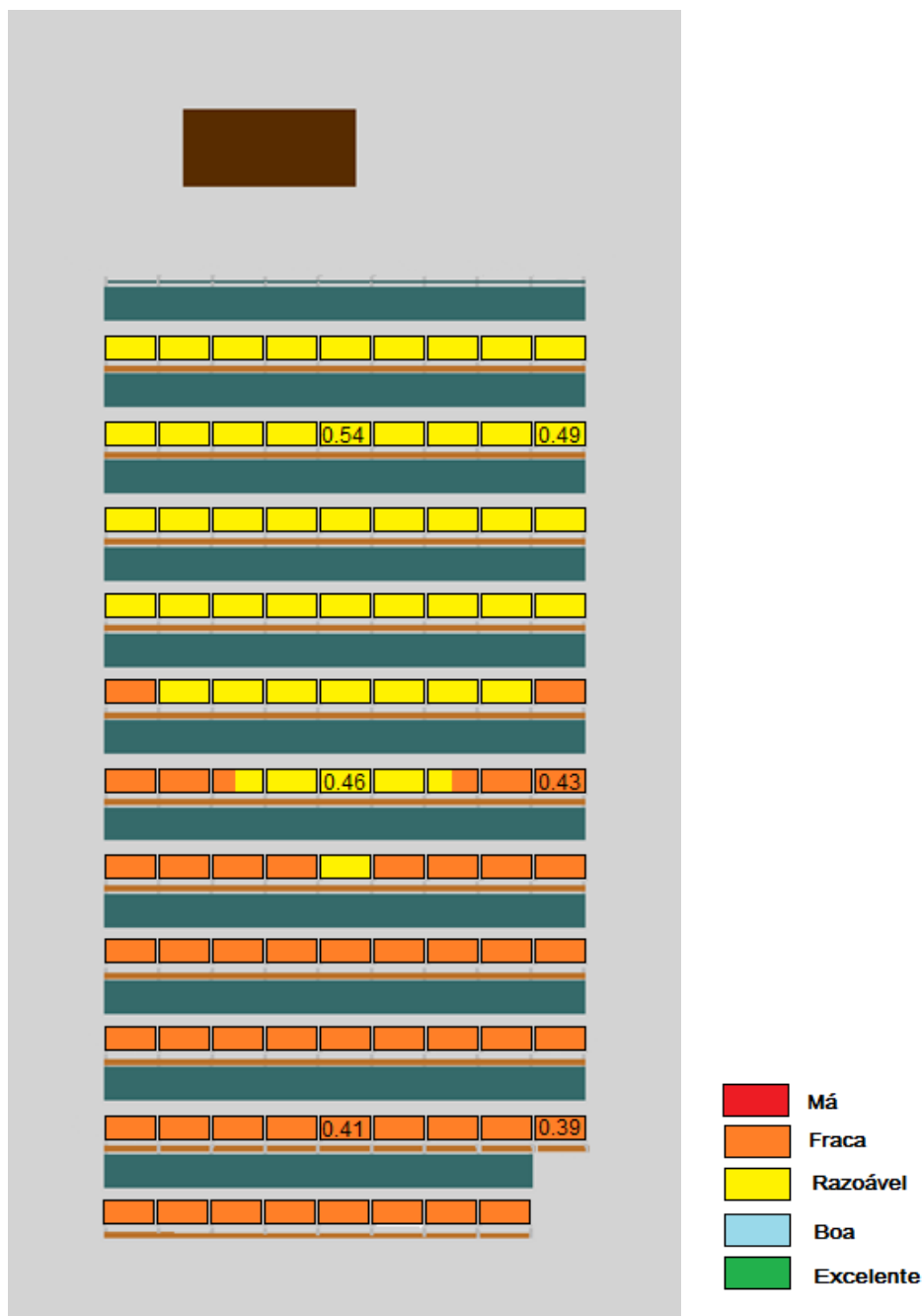


Figura 4.15: RASTI na sala B013

#### 4.1.4 Definição ( $D_{50}$ ) e Claridade ( $C_{50}$ )

##### 4.1.4.1 Método e Pontos de Medição

No dia 7 de Abril de 2017, pelas 17h, foram realizados ensaios com intuito de obter a  $D_{50}$  e  $C_{50}$ . Para a obtenção destes parâmetros objetivos da definição e claridade do espaço, foi utilizada a cadeia de medição da figura 4.5, e ainda o emissor sonoro Yamaha HS 80M da figura 4.6.



Para o cálculo dos parâmetros, foram emitidos 100 impulsos unitários à frequência de amostragem de 44100 Hz com intervalos de 3 segundos. As respostas foram captadas pelos dois microfones Brüel & Kjær (modelos 4190 e 4135), e posteriormente estes sinais foram analisados no *software* Matlab. Para o cálculo da definição e para cada sinal resultante de cada impulso, foi feita a divisão entre a energia do sinal nos primeiros 50 ms e a sua energia total. Finalmente, foi feita a média dos valores obtidos para os 100 sinais. O código Matlab desenvolvido para o cálculo do parâmetro da definição é apresentado no anexo B.2.

A distinção entre os dois parâmetros, definição e claridade, centra-se na forma de cálculo. Uma vez que é possível obter a claridade a partir da definição (e vice versa) utilizou-se a fórmula 2.7 para o cálculo do parâmetro pretendido. O código desenvolvido para o cálculo da claridade é apresentado no anexo B.3.

Para este ensaio os microfones estavam colocados nas mesmas posições da medição do tempo de reverberação, ou seja, nos lugares centrais das filas 2 e 6. No entanto, a posição da fonte sonora foi alterada tendo esta sido colocada atrás da mesa, como estaria geralmente o docente. A representação dos pontos de medição e da fonte sonora estão apresentados na planta da figura 4.16.

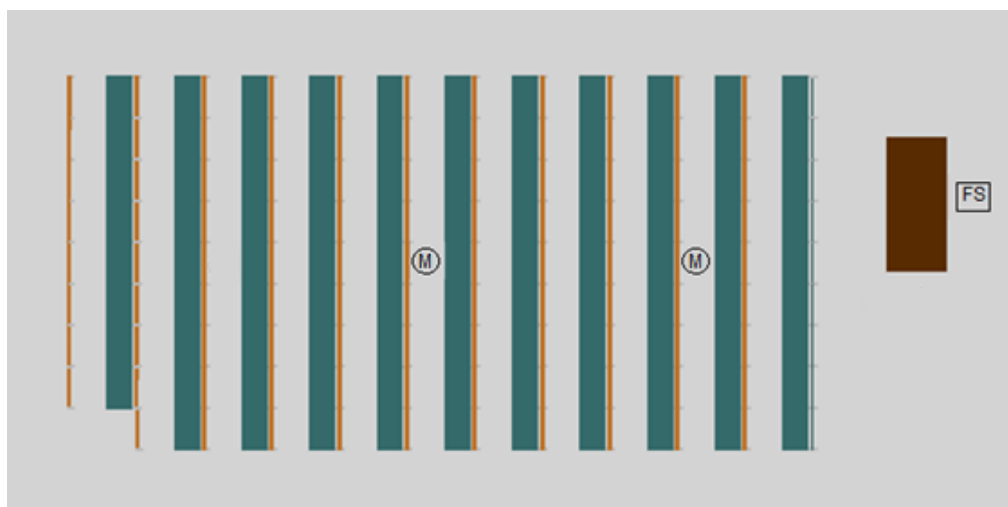


Figura 4.16: Pontos de medição da definição e claridade

#### 4.1.4.2 Resultados

Os valores obtidos para a definição no anfiteatro B013 foram 0,45 para a fila 2 e 0,26 para a fila 6.

Os valores obtidos para a claridade no anfiteatro B013 foram de -0,79dB para a fila 2 e de -4,51dB para a fila 6.

## **4.1.5 Ruído de Fundo**

### **4.1.5.1 Método e Pontos de Medição**

O ruído de fundo do anfiteatro B013 foi medido no dia 19 de Maio de 2017 pelas 16h30. O mesmo foi obtido com recurso ao sonómetro 2260 da Brüel & Kjær, apresentado na figura 4.3, que foi colocado no lugar central da fila 6. O sonómetro apresenta a capacidade de fazer esta medição sem necessidade de recorrer a mais material. Na figura 4.17 está presente uma imagem do ensaio realizado para obtenção dos valores do ruído de fundo.

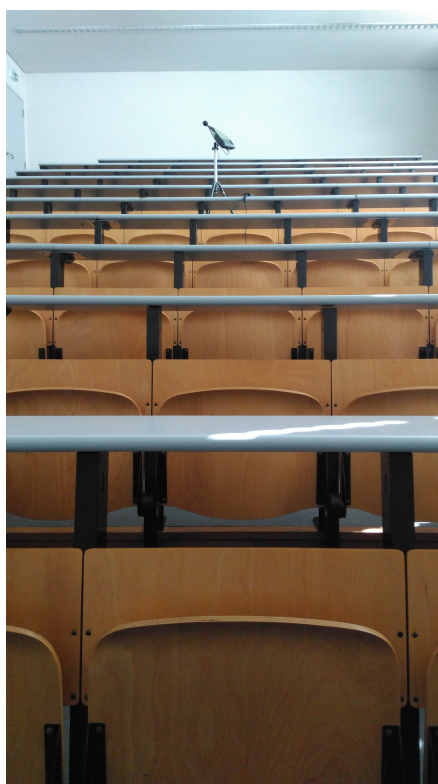


Figura 4.17: Medição do ruído de fundo com o sonómetro

### **4.1.5.2 Resultados**

O valor obtido com este ensaio para o ruído de fundo em banda larga foi de 38,4 dBA e 51,9 dB. Na figura 4.18 e no anexo C são ainda apresentados os valores do ruído de fundo em terços de oitava no anfiteatro em estudo (em dB).

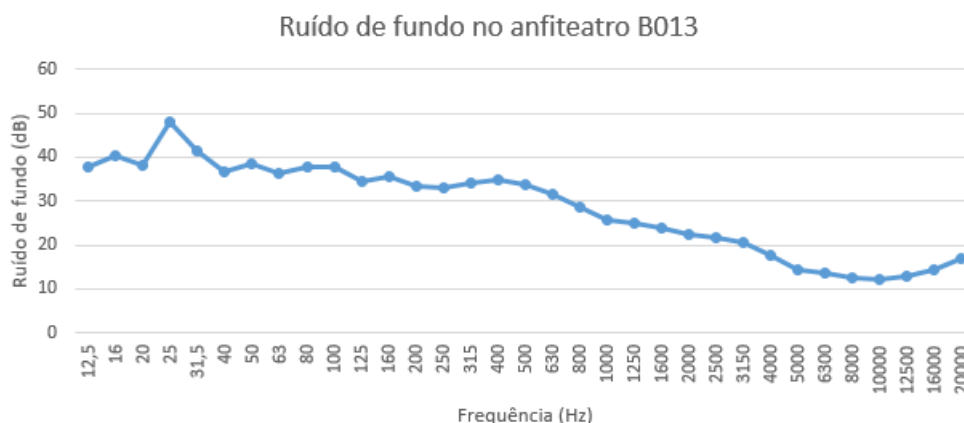


Figura 4.18: Ruído de fundo no anfiteatro B013 (dB)

#### 4.1.6 Resposta Impulsional e ETC do Anfiteatro

##### 4.1.6.1 Método e Pontos de Medição

Tendo em conta o impacto das reflexões sonoras na inteligibilidade da palavra, considerou-se importante nesta avaliação fazer um estudo da resposta impulsional do espaço e ainda da ETC (Curva temporal do envelope). Com isto é pretendido observar as reflexões provocadas num sinal pela envolvente de um espaço.

O método para obtenção da resposta impulsional de um espaço consiste na excitação do mesmo através de impulsos unitários e gravação do sinal resultante, que irá apresentar as reflexões provocadas pela envolvente quando exposta a este sinal. Note-se que para o cálculo dos parâmetros definição e clareza o método de aquisição foi o mesmo, ou seja, gravação de impulsos unitários no espaço em estudo, os pontos e método de medição para obtenção da resposta impulsional mantém-se também os mesmos usados para esses parâmetros uma vez que o sinal estudado foi o mesmo. O código utilizado para a análise da resposta impulsional é apresentado no anexo B.4.

A ETC representa a magnitude do sinal analítico da resposta impulsional e é semelhante a uma versão suavizada do quadrado da mesma mas que evidencia melhor a modulação de amplitude. A resposta impulsional contém todos os dados necessários para análise das reflexões provocadas por um espaço mas a ETC apresenta algumas reflexões com maior clareza devido à componente de modulação da envolvente do sinal, pelo que é essa a razão que torna vantajoso fazer este estudo adicional. Para o cálculo da ETC é utilizada a transformada de Hilbert que permite obter a versão analítica de um sinal. O sinal analítico é complexo e unilateral nas frequências o que permite remover a ambiguidade naturalmente existente entre frequências positivas e negativas no sinal real e é composto pela soma da resposta impulsional (parte real) com a parte imaginária, que é obtida aplicando a transformada de Hilbert à parte real do sinal. A ETC é obtida através do módulo do sinal analítico, apresentando assim a magnitude do mesmo. No anexo B.5 é apresentado o código desenvolvido para obter a ETC.

#### 4.1.6.2 Resultados

A resposta impulsional obtida nos locais em estudo a partir da experimentação está representada nas figuras 4.19 e 4.20.

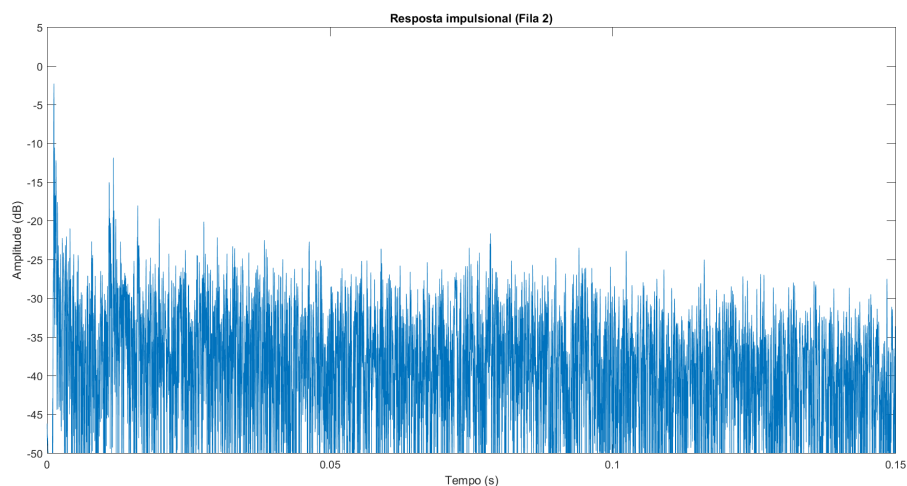


Figura 4.19: Resposta impulsional do anfiteatro no lugar central da fila 2 com a fonte sonora na posição indicada na figura 4.16

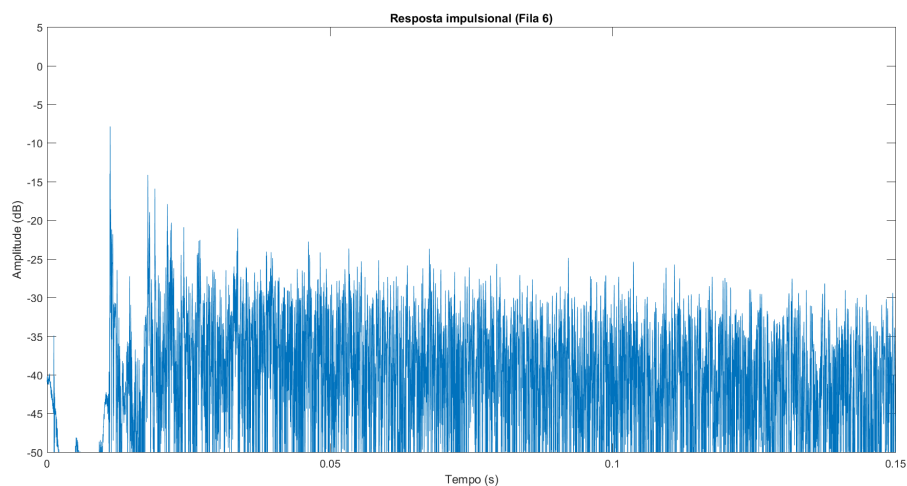


Figura 4.20: Resposta impulsional do anfiteatro no lugar central da fila 6 com a fonte sonora na posição indicada na figura 4.16

Os resultados obtidos para a ETC estão presentes nas figuras 4.21 e 4.22. Para os sinais obtidos foi feita uma análise às reflexões do espaço e identificadas aquelas que são construtivas da percepção subjetiva e as que são prejudiciais segundo critérios psicoacústicos já mencionados. Para este efeito foram assinalados a preto o impulso proveniente do som direto, a verde as reflexões iniciais e a vermelho as reflexões tardias (após 50 ms) e que podem ser prejudiciais.

Através da análise da ETC da fila 2 é de salientar a reflexão tardia que chega ao local de medição no instante 0,07844 s (última reflexão a vermelho). Mediante a duração do intervalo de tempo que decorreu entre a chegada do som direto e esta chegada, e sabendo a velocidade de propagação do som no ar, é possível calcular a distância que este sinal percorreu e procurar definir o seu trajeto. Calculando  $(0,07844 - 0,001224) \times 343$ , que representa a multiplicação da velocidade de propagação sonora com a duração do intervalo de tempo entre a chegada do som direto e a reflexão tardia, sabe-se que o sinal percorreu 26 m após a chegada do som direto. Tendo em conta as dimensões da sala e os percursos possíveis na mesma traçados num alçado, conclui-se que esta reflexão de intensidade elevada deverá ser provocada por reflexões na parede traseira e teto da sala.

Seguindo o mesmo método, para a fila 6 observa-se um pico de intensidade aos 0,0676 s (primeira reflexão a vermelho). Fazendo novamente o cálculo da diferença entre a chegada do som direto e da reflexão tardia e multiplicando pela velocidade de propagação sonora obtém-se a distância de 19 m que, novamente, poderá ser provocada por reflexões na parte traseira da envolvente.

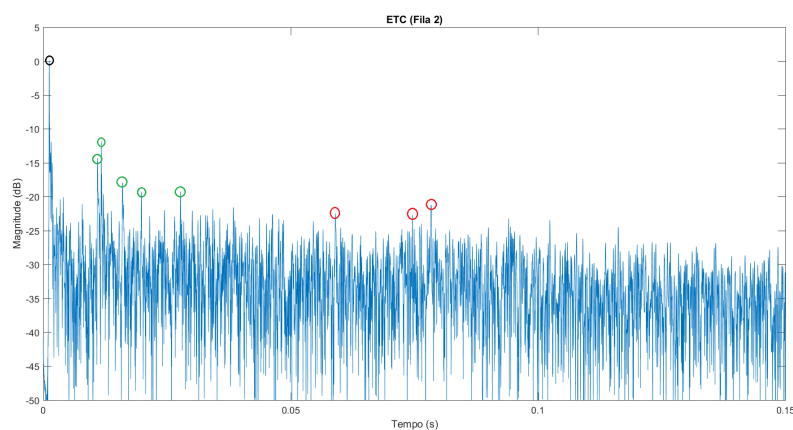


Figura 4.21: ETC do anfiteatro no lugar central da fila 2

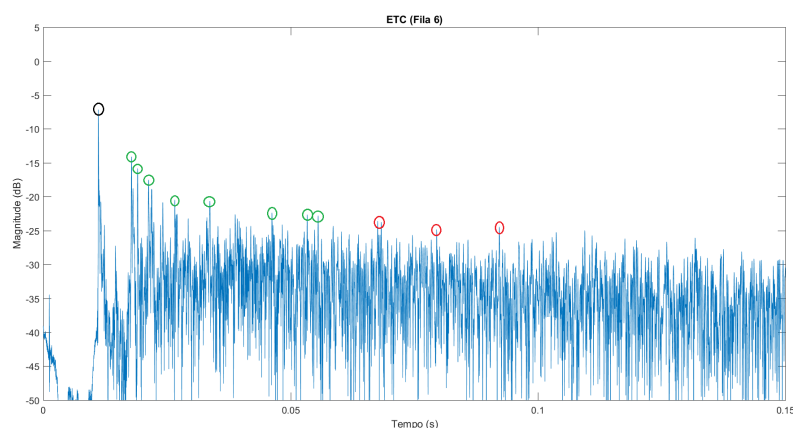


Figura 4.22: ETC do anfiteatro no lugar central da fila 6

Fazer este estudo para as reflexões mais críticas é essencial para entender a origem do problema da falta de inteligibilidade e corrigi-lo, através da intervenção nas superfícies responsáveis.

#### 4.1.7 Análise dos Resultados

Tendo sido anteriormente apresentados valores para diversos parâmetros de avaliação acústica, será agora feita uma análise aos mesmos, procurando localizá-los relativamente à gama de valores adequados.

Começando por analisar o tempo de reverberação obtido, e considerando que para o espaço em análise este valor não deveria ser superior a 0,7 s-0,8 s para frequências nas oitavas de 500-1k Hz, conclui-se que o anfiteatro B013 se encontra muito aquém do valor ideal. Dado que os valores obtidos foram  $Tr[500-1kHz]$  de 2,42 s com o sonómetro, e de 2,36 s com o Matlab.

Passando para a análise dos valores do RASTI, e recorrendo à tabela 2.1, sabe-se que para uma classificação subjetiva de inteligibilidade avaliada como "boa", é necessário ter valores de RASTI superiores ou iguais a 0,6. Uma vez que os valores obtidos estão entre 0,39 e 0,54, conclui-se a partir da tabela 2.1, que o anfiteatro tem uma classificação subjetiva de inteligibilidade entre "fraca" e "razoável". Mais uma vez, este resultado encontra-se aquém do que é desejável.

Relativamente à definição e clareza, seriam idealmente esperados valores superiores a 0,5 para o primeiro parâmetro e 0 dB para o segundo. No entanto, nenhum dos valores obtidos preenche estes requisitos, tendo sido obtidos valores inferiores a 0,45 para a definição e -0,79 dB para a clareza.

Finalmente, fazendo uma análise ao ruído de fundo no anfiteatro B013, e sabendo que espaços de aula ideais deverão ter um ruído de fundo inferior a 40 dBA, conclui-se que o valor deste parâmetro se encontra dentro da gama aceitável, tendo sido obtido o valor de 38,4 dBA. No entanto, a margem para exceder o limite adequado é pequena, podendo justificar alguma intervenção específica complementar, que, contudo, não foi abordada nesta dissertação.

Tabela 4.3: Análise dos valores obtidos para os parâmetros no anfiteatro B013

Parâmetro	Gama adequada	Valor obtido
Tr [500-1kHz] (s)	0,7-0,8	2,42
RASTI	$\geq 0,6$	0,39-0,54
Definição	$> 0,5$	$\leq 0,45$
Clareza (dB)	$> 0$	$\leq -0,79$
Ruído de fundo (dBA)	$< 40$	38,4

Analisando os valores apresentados na tabela 4.3, conclui-se que o único parâmetro que se encontra dentro da gama adequada é o ruído de fundo.

Observando ainda os gráficos obtidos para a ETC, conclui-se que existem bastantes reflexões tardias e com intensidade elevada, que são bastantes prejudiciais para o claro entendimento do que é falado nesse espaço, uma vez que destroem a coerência subjetiva do som ao invés de a melhorarem.

Sendo a principal função do anfiteatro em estudo a sua utilização para efeito da palavra, é de assinalar que parâmetros tão importantes para a caracterização do espaço nesse domínio fiquem tão aquém do que seria adequado. Prova-se assim que o espaço não se encontra adaptado à sua finalidade pelo que surge uma clara necessidade de intervenção.

## 4.2 Ensaio em Câmara Reverberante - Impacto da Presença de Pessoas e Materiais

Com o intuito de caracterizar a influência das pessoas e dos materiais no anfiteatro B013, foi realizado um ensaio na câmara reverberante da FEUP. Assim, entre os dias 25 e 26 de Maio de 2017, foram realizadas medições relativas ao tempo de reverberação e ao ruído originário dos ocupantes da sala. O primeiro tem como objetivo perceber o impacto da presença de pessoas ou materiais na absorção sonora. O segundo pretende simular o comportamento do ser humano em espaços de aula, realizando algumas tarefas características, para perceber o impacto que o ruído poderá ter a nível acústico, estando as fontes sonoras parcelares distribuídas pelo anfiteatro.

Para este ensaio, e com a intenção de o tornar o mais realista possível, foi construída uma pequena representação celular do anfiteatro. Esta está demonstrada na figura 4.23 e consiste em 3 lugares, número que se sabe ser uma terça parte do mínimo aconselhado na normalização, mas que, contudo, foi o que estava materialmente disponível para o presente trabalho.

Dos resultados deste ensaio, cuja validade não pode ser afirmada, foram contudo obtidos resultados inferentes quer em termos de formação quer em termos de avaliação quantitativa.



Figura 4.23: Montagem para ensaio em câmara reverberante

### 4.2.1 Absorção Sonora de Pessoas e Materiais

Relativamente à medição do tempo de reverberação, à semelhança dos testes realizados no anfiteatro B013, foi usado o método de aquisição de dados com o sonómetro e com a cadeia de medição.

Assim, a medição do tempo de reverberação consistiu em várias fases. Começando pela medição da influência das pessoas no espaço, realizaram-se ensaios sucessivos, sendo o primeiro com

a presença de três pessoas na câmara e a exclusão sucessiva das mesmas até à sua ausência. Posteriormente foi desenvolvido um ensaio semelhante para caracterizar a influência dos materiais. Desta forma, foram-se eliminando as várias componentes do anfiteatro criado até à câmara estar completamente vazia. A ordem de presença dos materiais foi: anfiteatro sem pessoas, sem bancos, sem tampo e finalmente sem prumos. Os resultados obtidos estão representados na figura 4.24 e 4.25.

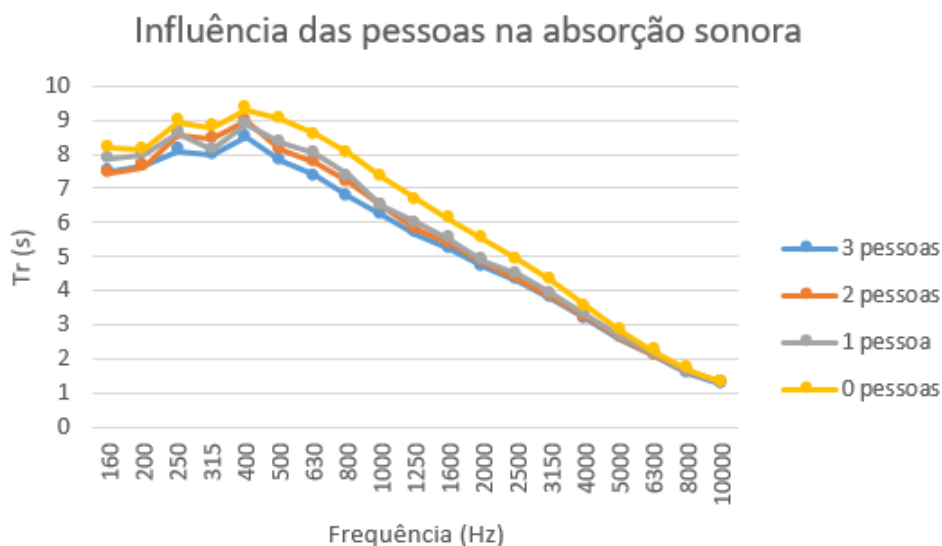


Figura 4.24: Influência das pessoas na absorção sonora

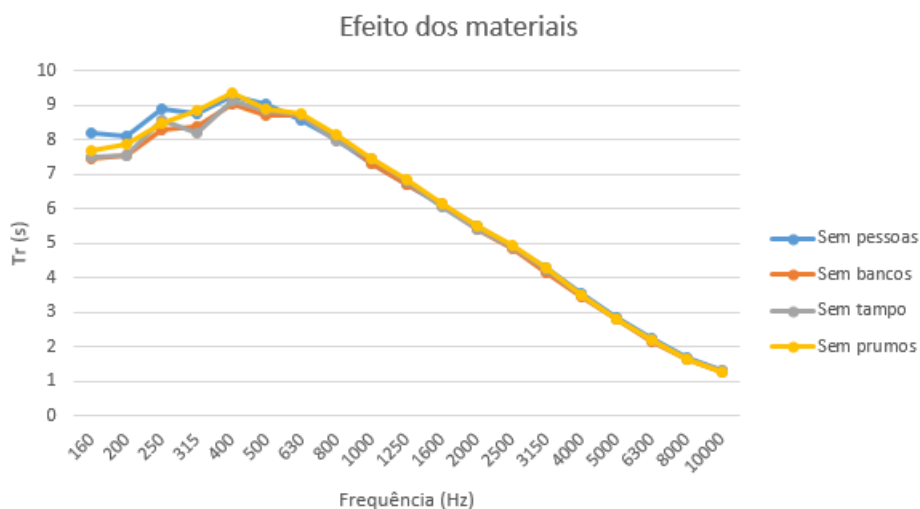


Figura 4.25: Influência dos materiais do anfiteatro B013 na absorção sonora

Analisando a imagem 4.24 conclui-se facilmente existir uma influência claramente observável da presença de pessoas num espaço, sendo estas um elemento absorvente de som, daí a diferença de valores obtidos para o Tr sem pessoas e com várias pessoas.



#### 4.2 Ensaio em Câmara Reverberante - Impacto da Presença de Pessoas e Materiais

No entanto, o ensaio relativo aos materiais não provou ser tão claro uma vez que as áreas dos materiais estudados foram pequenas pelo que seria necessário ter uma amostra substancialmente maior para obter conclusões mais claras. A partir destes ensaios, e recorrendo à fórmula 2.4 é possível estimar o valor da absorção sonora de cada componente, sabendo o valor de Tr com ( $Tr_1$ ) e sem ( $Tr_0$ ) o material analisado no espaço.

Assim, para este cálculo, sabe-se que sem a presença do material em estudo, o cálculo da superfície equivalente da absorção sonora equivalente do espaço é dada pela equação 4.1. Sabe-se ainda que o valor da absorção sonora localizada do material em estudo é dada pela equação 4.2.

$$A = \frac{0,16.V}{Tr_0} - mV \quad (4.1)$$

$$A_j = \frac{0,16.V}{Tr_1} - A - mV \quad (4.2)$$

Destas equações extrai-se a fórmula de cálculo simplificada para  $A_j$ , que vem dada por:

$$A_j = \frac{0,16.V}{Tr_1.Tr_0}(Tr_0 - Tr_1) \quad (4.3)$$

Para o cálculo dos coeficientes de absorção para cada material, divide-se o valor de  $A_j$  pela área da superfície real exposta ao som do material analisado. Esta fórmula está expressa na equação 4.4.

$$\alpha = \frac{A_j}{S} \quad (4.4)$$

Os resultados obtidos para a absorção sonora localizada por pessoa e materiais ( $m^2$ ) estão apresentados na tabela 4.4 e os resultados obtidos para os coeficientes de absorção dos materiais, dada a sua menor relevância, estão apresentados no anexo D.

Como se pode observar os valores obtidos para a absorção sonora localizada dos materiais apresentam vários valores nulos, sendo a maior parte obtida por truncatura de valores negativos, ficando aquém da qualidade que seria necessária. Desta forma, conclui-se que a amostra utilizada não foi suficientemente grande para tirar conclusões sobre os valores de absorção dos materiais e que, devido à aleatoriedade das corridas do sinal utilizado, o desvio padrão obtido entre medições foi demasiado grande. Para melhorar esta situação surge a ideia de utilizar uma fonte sonora, a emitir um sinal sempre igual entre ensaios, sincronizada com o método de medição para assim retirar as diferenças aleatórias entre corridas.

Mesmo assim, este ensaio permitiu extrair informação preliminar sobre o impacto das pessoas na absorção sonora num espaço.

Tabela 4.4: Absorção sonora localizada por pessoa e materiais ( $m^2$ )

Frequência (Hz)	$A_j/\text{pessoa} (m^2)$	$A_j/\text{banco} (m^2)$	$A_j/\text{mesa} (m^2)$	$A_j/\text{prumo} (m^2)$
160	0,18	0	0,02	0,03
200	0,12	0	0,03	0,4
250	0,19	0	0,18	0
315	0,18	0	0	0,07
400	0,16	0	0,04	0,02
500	0,28	0	0,11	0
630	0,31	0,03	0	0,01
800	0,37	0,01	0	0,03
1000	0,39	0	0,12	0
1250	0,43	0,01	0,12	0,01
1600	0,45	0,02	0	0,02
2000	0,49	0	0,02	0,02
2500	0,46	0	0,12	0,02
3150	0,50	0	0,22	0,01
4000	0,54	0	0,08	0
5000	0,56	0	0,18	0
6300	0,52	0	0,3	0
8000	0,54	0	0	0
10000	0,48	0	0,29	0

#### 4.2.2 Ruído Produzido por Pessoas em Espaços de Aula

Numa segunda fase deste ensaio, pretendeu-se simular o ruído produzido por uma pessoa a realizar atividades características de um espaço de aula, tais como mexer-se na cadeira, sussurrar e manipular material escolar. Mais uma vez esta medição foi feita através do sonómetro e da segunda cadeia de medição. Para este ensaio houve necessidade de calibrar o sistema recorrendo ao calibrador 4231 da Brüel & Kjær [37] presente na figura 4.26.



Figura 4.26: Calibrador 4231 da Brüel & Kjær

Os valores obtidos a partir dos dois métodos foram bastante aproximados. O ruído produzido por três pessoas na câmara em silêncio é de 24,7 dBA. Os resultados obtidos através do sonómetro para uma pessoa a realizar diversas atividades e para várias pessoas a mexer na cadeira estão sistematizados nas tabelas 4.5 e 4.6.

A partir da primeira tabela conclui-se que a tarefa que produz mais ruído no anfiteatro é a movimentação na cadeira. Na segunda tabela observa-se que há um aumento do valor de ruído

Tabela 4.5: Ruído produzido por uma pessoa a realizar diversas atividades

Nº de pessoas	1		
Atividade tipo	Sussurrar	Folhear	Mexer na cadeira
Ruído de fundo (dBA)	46,1	43,2	49,5

Tabela 4.6: Ruído produzido por várias pessoas a mexer na cadeira

Nº de pessoas	1	2	3
Atividade tipo	Mexer na cadeira		
Ruído de fundo (dBA)	45,2	48,2	52

por atividade, neste caso, mexer na cadeira, em aproximadamente 3 dBA por pessoa. Este ensaio apresenta alguma aleatoriedade uma vez que, o nível de ruído produzido por uma pessoa em determinada atividade depende do grau de intensidade com que a realiza, existindo assim diferenças de valores entre ensaios. Para obter o maior grau de precisão possível nos valores obtidos, no primeiro ensaio a pessoa que realizou as atividades foi sempre a mesma e com nível semelhante de intensidade, e no segundo ensaio foi escolhido um intervalo de tempo determinado entre movimentações, de forma a que não houvessem pessoas mais ativas do que outras a mexer na cadeira.

### 4.2.3 Conclusão

Com a realização deste ensaio pretendeu-se demonstrar o método para a caracterização da absorção de materiais, pessoas e produção de ruído presentes num espaço. O intuito será posteriormente usar estes resultados na simulação computacional de forma a calibrar o modelo. Não foram utilizados os valores obtidos para os coeficientes de absorção uma vez que a amostra se provou ser pequena, contudo foi útil para estudar o método de base teórica, e perceber que, efetivamente, as pessoas são elementos absorventes e que o ruído produzido pelas pessoas, nomeadamente em espaços de aula, contribui para o nível total de ruído no espaço tornando a situação menos favorável.

## 4.3 Simulação Acústica (EASE)

A simulação acústica é uma ferramenta muito poderosa para o desenho acústico de um espaço.

Do ponto de vista formativo esta torna-se propícia por ser mais potente, uma vez que servindo tanto para a fase de projeto como para a fase de correção do problema acústico de um espaço fechado, supera o método da folha de cálculo com tentativas, que é muito mais moroso, menos preciso e menos detalhado. Assim, considerou-se importante para este projeto o uso de um *software* de simulação acústica, mais precisamente o EASE (já disponível no laboratório da faculdade), para obter não só os parâmetros acústicos descritivos do espaço bem como fazer a comparação com os seus valores obtidos a partir da avaliação acústica experimental de forma a validar o modelo, mas também para ter a possibilidade de posteriormente simular melhorias por

alteração das características materiais e/ou introduzindo um sistema de reforço sonoro. Nesta secção será explicado o método de construção do modelo do anfiteatro B013, assim como os valores obtidos para os seus parâmetros descritivos através da simulação.

### **4.3.1 Modelo Arquitectónico**

Para a análise de um espaço é necessário começar por desenhar ou importar o modelo arquitectónico do espaço e torná-lo fechado em termos geométricos. Desta forma, o primeiro passo a dar na fase de modelação passou por obter a planta do anfiteatro, e tirar medidas confirmativas ao espaço para verificar se os dados fornecidos pela planta coincidem com a realidade, uma vez que é sabido haver geralmente pequenos desvios causados pela construção. No espaço ocorreram alterações ao projeto, pelo que o modelo criado foi construído com base em medidas extraídas do local. Após a reunião de todos os dados necessários, passou-se à construção do modelo, sendo o resultado apresentado na figura 4.27 em perspetiva.

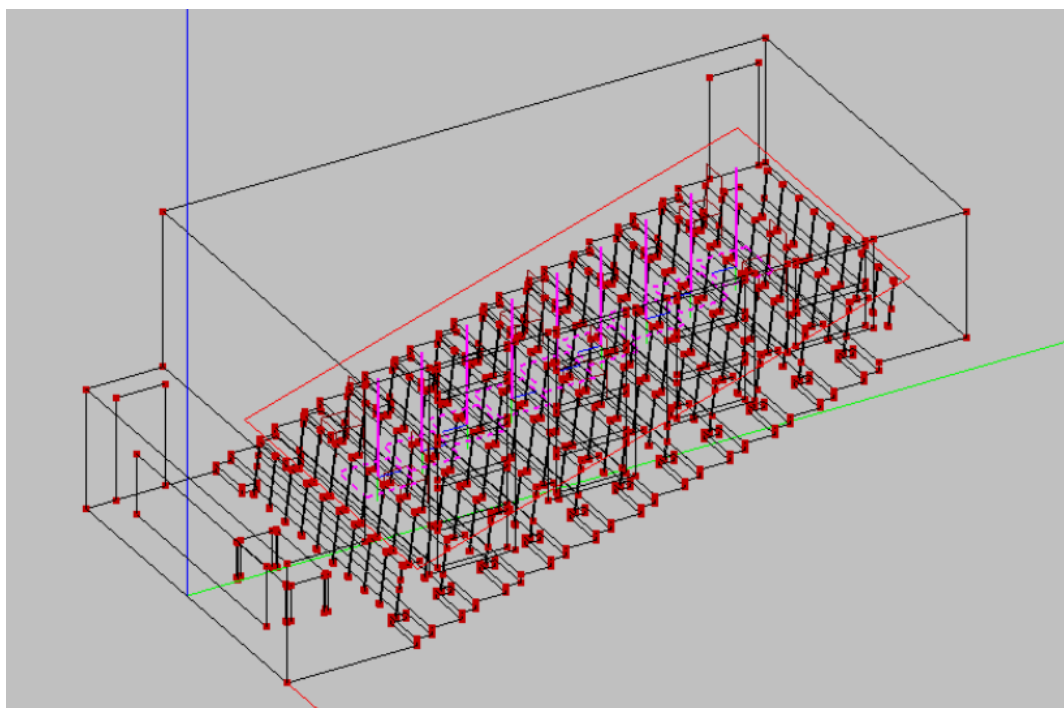


Figura 4.27: Vista de edição do modelo EASE do anfiteatro B013

Posteriormente, com a estrutura e componentes do modelo terminados, passou-se para uma fase de identificação dos tipos de materiais existentes no espaço. Esta fase é crítica para a obtenção de resultados realistas para o modelo, uma vez que os vários parâmetros a determinar dependem fortemente dos coeficientes de absorção sonora dos materiais, e das respetivas áreas ocupadas no espaço.

Como o acesso à lista de materiais utilizados na fase de construção pode ser difícil, tornar-se-á por vezes complicado determinar com certeza quais os materiais presentes no espaço, principalmente na fase de correção. Assim, a partir do método exposto anteriormente de cálculo dos coeficientes de absorção sonora a partir de ensaios em câmara reverberante, é possível introduzir no *software* em uso os valores obtidos para cada material, possibilitando um modelo mais próximo do real. Na figura 4.28 pode ver-se em outra perspetiva a representação da versão final do modelo em EASE do anfiteatro B013, com a representação dos materiais de cada elemento já devidamente atribuídos.

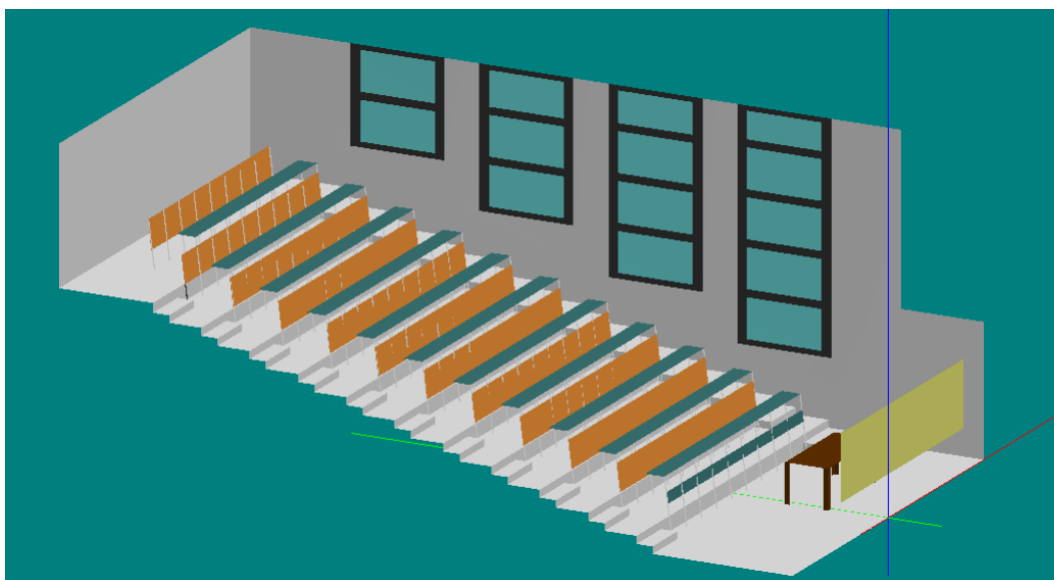


Figura 4.28: Visão arquitetural do modelo do anfiteatro B013

Dado o modelo como concluído, foi possível passar para a fase seguinte da simulação computacional dos parâmetros acústicos.

#### 4.3.2 Parâmetros Acústicos sem Ocupação

Ultrapassada a fase de construção do modelo, foi possível obter os parâmetros acústicos pretendidos através da simulação no *software*. Estes parâmetros são o tempo de reverberação, o RASTI e a claridade. Foi ainda extraído o refletograma, a resposta impulsional do espaço e a ETC para vários pontos. No entanto, para ser possível obter os valores pretendidos (excepto para o tempo de reverberação), foi necessário introduzir pelo menos uma fonte sonora e uma área de audiência e/ou um lugar de audiência para a obtenção de resultados nesse espaço ou local. Na figura 4.29 observa-se noutra perspetiva e a verde a área de audiência utilizada nos testes, os lugares de audiência estão assinalados a preto e vermelho e o altifalante está representado a azul.

Os pontos assinalados de 1 a 6 (lugares de audiência) presentes nas figuras resultantes da simulação que irão ser apresentadas representam: 1- Lugar central da fila 2; 2- Lugar extremo da fila 2; 3- Lugar extremo da fila 6; 4- Lugar extremo da fila 10; 5- Lugar central da fila 6; 6- Lugar central da fila 10.

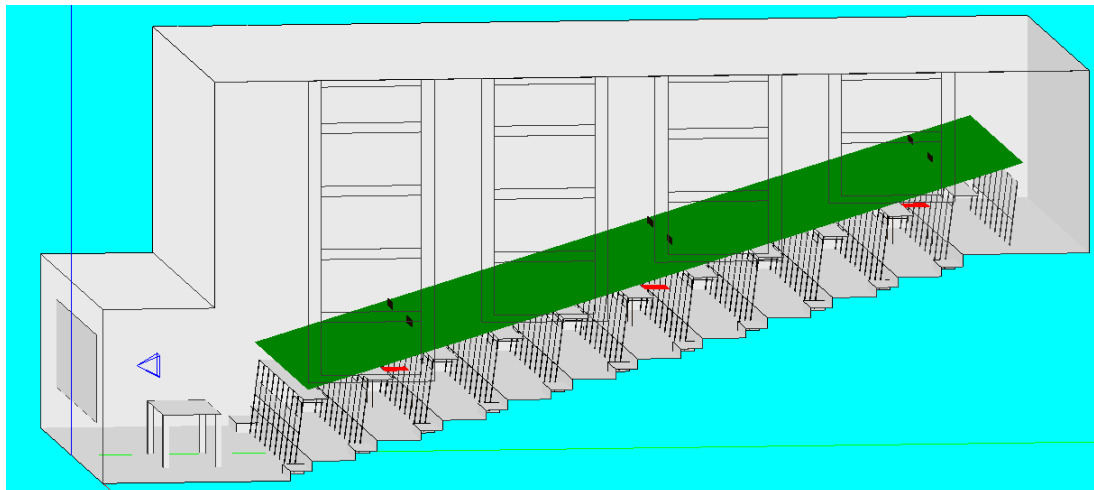


Figura 4.29: Altifalante e área e lugares de audiência

#### 4.3.2.1 Tempo de Reverberação

O primeiro parâmetro obtido a partir da simulação em EASE foi o tempo de reverberação. Na figura 4.30 e na tabela 4.7 podem observar-se os valores obtidos para o mesmo.

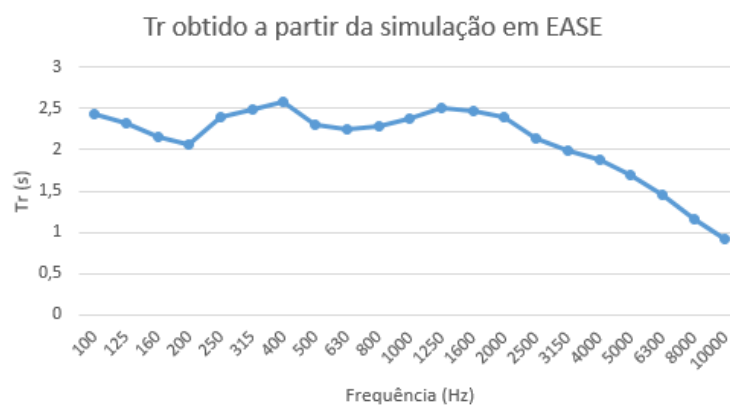


Figura 4.30: Tempo de reverberação obtido a partir da simulação em EASE

Tabela 4.7: Tempo de reverberação obtido a partir da simulação em EASE

Frequência (Hz)	Tr (s)
100	2,44
125	2,33
160	2,15
200	2,06
250	2,39
315	2,49
400	2,58
500	2,31
630	2,25
800	2,28
1000	2,38
1250	2,51
1600	2,48
2000	2,39
2500	2,13
3150	1,99
4000	1,88
5000	1,69
6300	1,45
8000	1,16
10000	0,92

#### 4.3.2.2 RASTI

A partir da simulação dos valores do RASTI no anfiteatro B013 foram obtidos os resultados presentes na planta da figura [4.31](#).

O valor médio obtido na simulação foi 0,43.

#### 4.3.2.3 Claridade

Passando agora para a simulação da claridade no *software* EASE, os valores obtidos são apresentados na planta da figura [4.32](#).

A média obtida a partir da simulação para este parâmetro foi -4,28 dB.

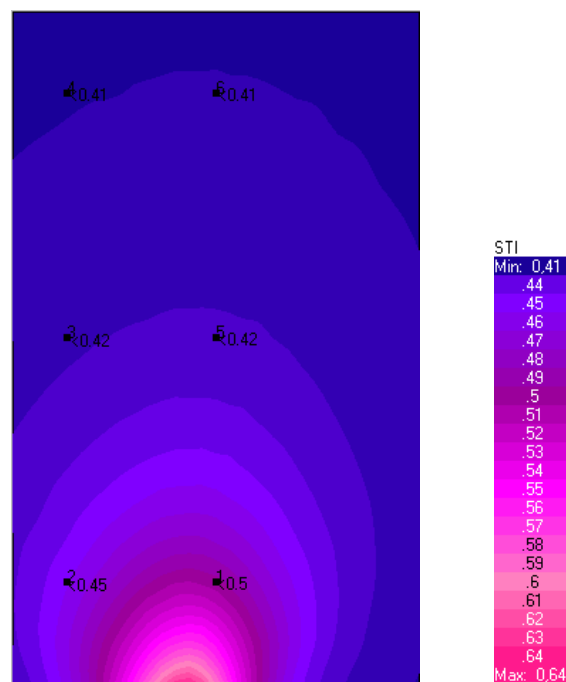


Figura 4.31: Valores de RASTI obtidos no EASE

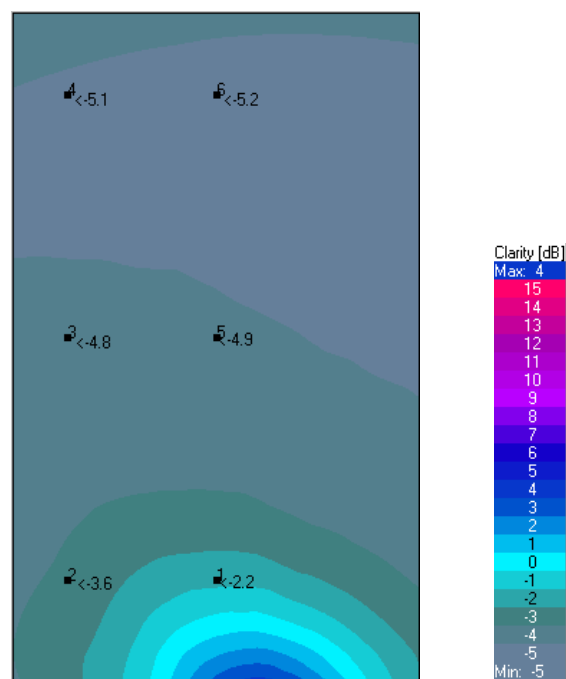


Figura 4.32: Valores de  $C_{50}$  obtidos no EASE

#### 4.3.2.4 Refletograma, Resposta Impulsional e ETC

O *software* EASE, utilizado nesta dissertação apresenta a possibilidade de simular o refletograma, a resposta impulsional e a ETC do anfiteatro para um determinado local escolhido. Assim, à semelhança da avaliação acústica, estes descritores foram obtidos através da simulação para os



lugares centrais das filas 2 e 6 do anfiteatro.

O refletograma apresenta os impactos dos impulsos, ou seja, está associado aos raios que incidem no local em estudo ao longo do tempo e é apresentado um refletograma para cada frequência central de sub-banda definida na simulação. A sub-divisão de bandas é definida em terços de oitava. Os refletogramas obtidos para a fila 2 e 6 à frequência de 1kHz estão presentes nas figuras 4.33 e 4.34. A azul é representado o impacto resultante do som direto e a verde os impactos das reflexões. O EASE apresenta ainda na legenda inferior o tempo de atraso entre a produção do sinal sonoro e a sua receção (som direto). Para a fila 2 este tempo é de 10,8 ms e para a fila 6 é de 21,5 ms.

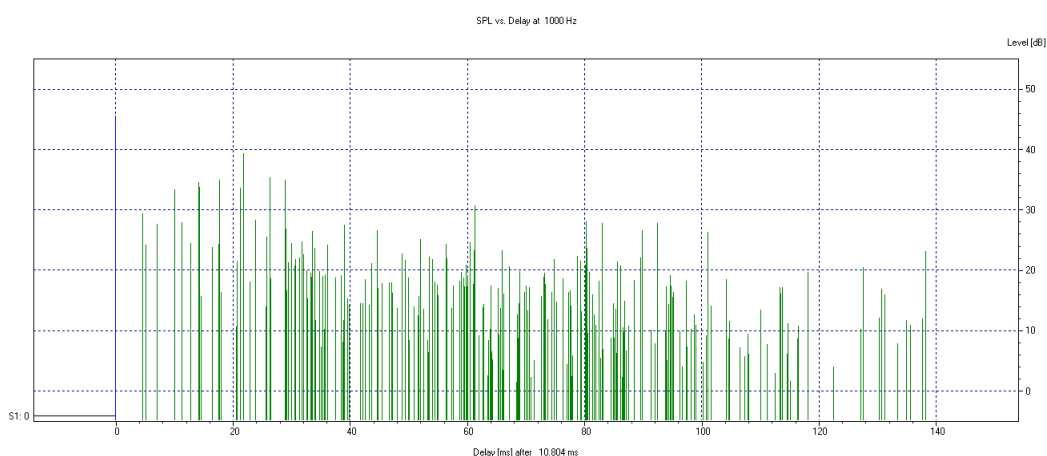


Figura 4.33: Refletograma do lugar central da fila 2 obtido com EASE

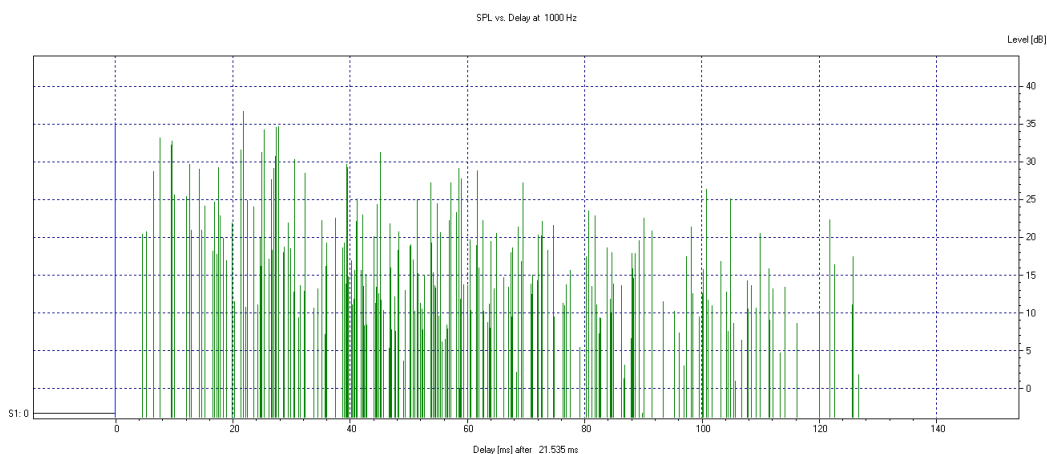


Figura 4.34: Refletograma do lugar central da fila 6 obtido com EASE

Relativamente à resposta impulsional, esta é obtida através da convolução dos 21 refletogramas de cada banda de terço de oitava com uma esfera unitária. As respostas impulsionais obtidas para cada um dos lugares em estudo estão representadas nas figuras 4.35 e 4.36.

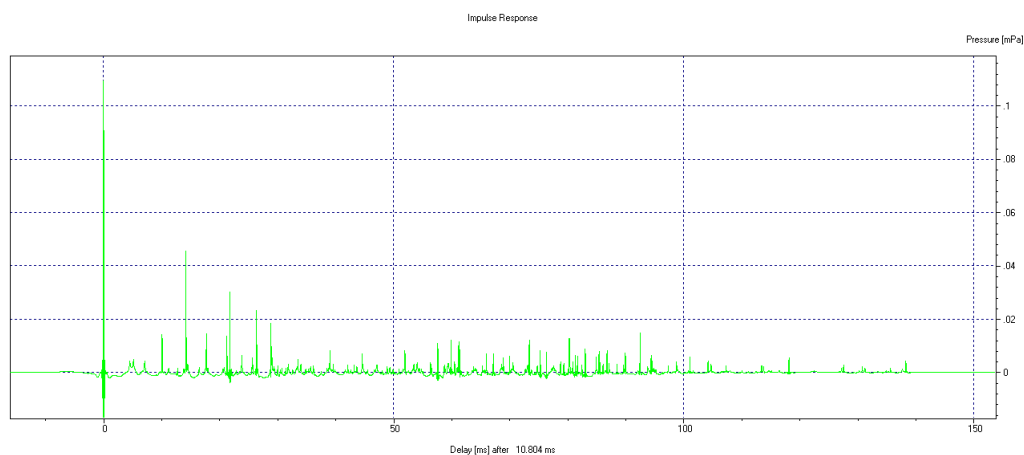


Figura 4.35: Resposta impulsional obtida no lugar central da fila 2 com o EASE

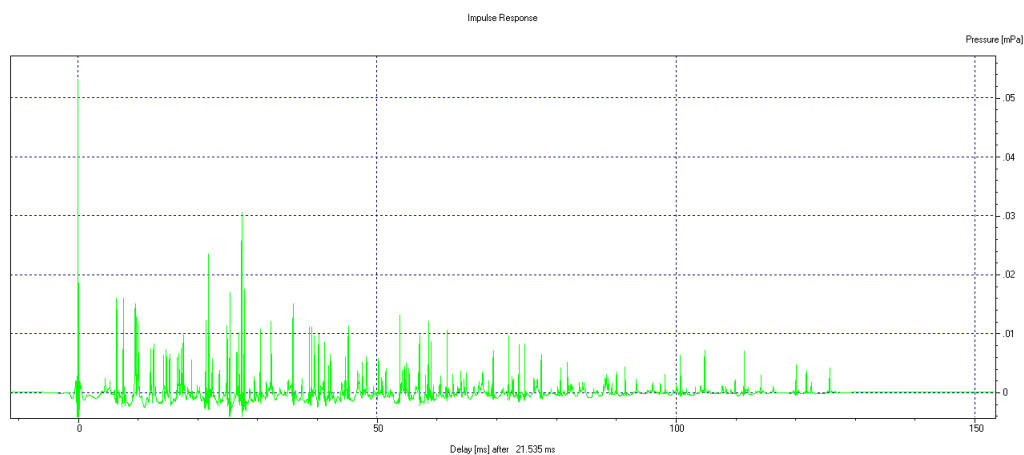


Figura 4.36: Resposta impulsional obtida no lugar central da fila 6 com o EASE

Finalmente, a ETC é calculada através do quadrado da resposta impulsional e de transformações a esse sinal. Para o anfiteatro em estudo, a ETC obtida através da simulação para os pontos anteriores (fila 2 e 6) está representada, respetivamente, nas figuras 4.37 e 4.38.

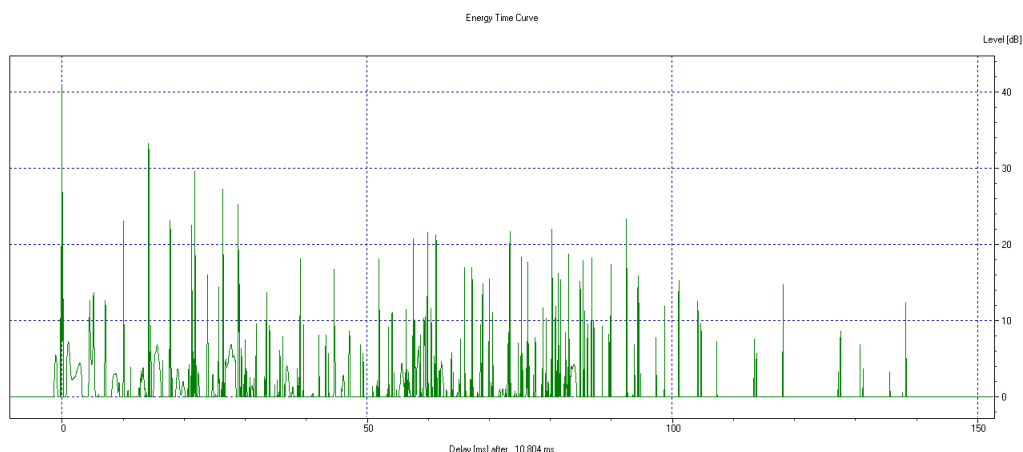


Figura 4.37: ETC na fila 2 obtido com EASE

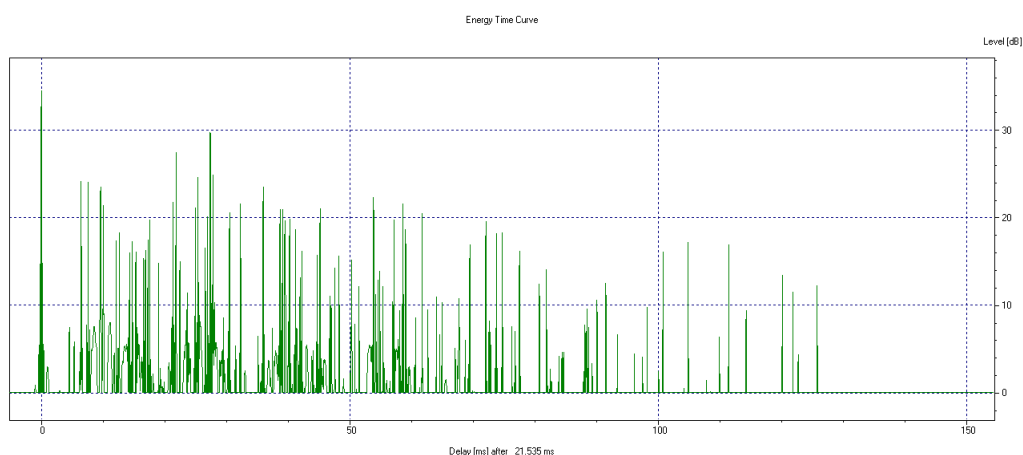


Figura 4.38: ETC na fila 6 obtido com EASE

Através da análise destas figuras é possível perceber a existência de reflexões tardias de elevada intensidade e, novamente, fazer o estudo da distância que o sinal percorreu.

#### 4.3.3 Parâmetros Acústicos com Ocupação

Foi ainda feito o estudo adicional do impacto da ocupação do anfiteatro uma vez que se sabe que as pessoas são elementos absorventes, pelo que têm influência nos valores dos parâmetros acústicos. Assim, analisou-se o tempo de reverberação e RASTI tendo este aspeto em consideração. Para tal, criaram-se retângulos representativos do tronco das pessoas (com o devido coeficiente de absorção) colocados nos lugares de audiência. Na figura 4.39 é apresentada uma figura com a representação descrita, sendo os retângulos verdes o equivalente às pessoas presentes no espaço.

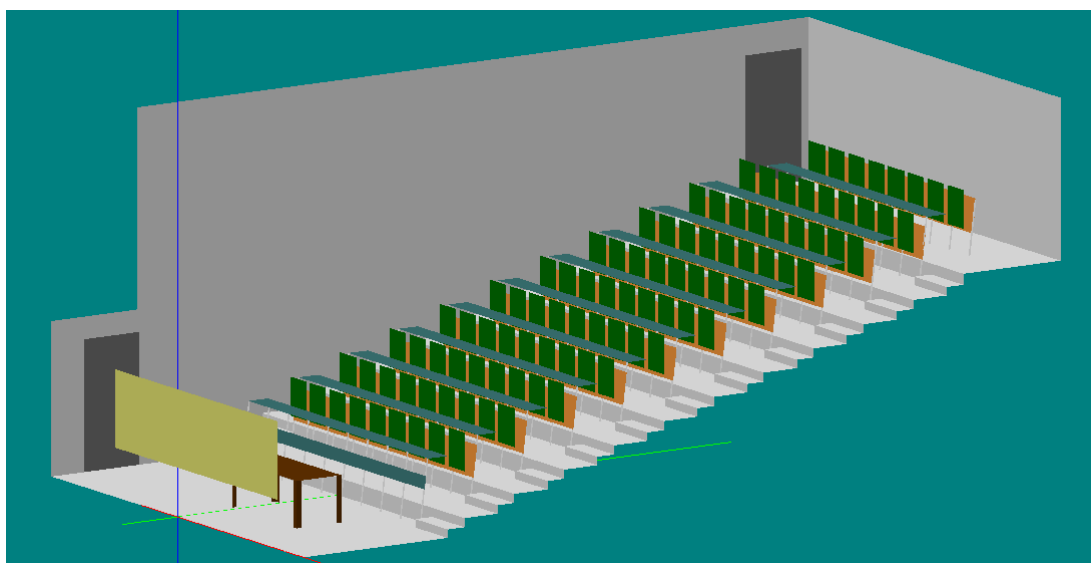


Figura 4.39: Ocupação total do anfiteatro

Para este estudo foram analisados o tempo de reverberação e o RASTI, como referido anteriormente. Os valores do primeiro parâmetro estão expostos na figura 4.40 e no gráfico 4.8 e os do segundo na planta da figura 4.41.

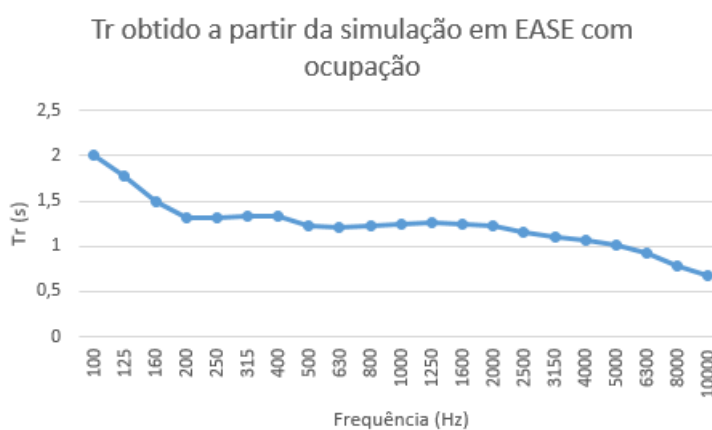


Figura 4.40: Tempo de reverberação com ocupação total obtido a partir da simulação em EASE

Tabela 4.8: Tempo de reverberação com ocupação total obtido a partir da simulação em EASE

Frequência (Hz)	Tr (s)
100	2,00
125	1,77
160	1,49
200	1,32
250	1,32
315	1,33
400	1,33
500	1,23
630	1,21
800	1,22
1000	1,24
1250	1,27
1600	1,25
2000	1,22
2500	1,15
3150	1,11
4000	1,07
5000	1,01
6300	0,92
8000	0,79
10000	0,67

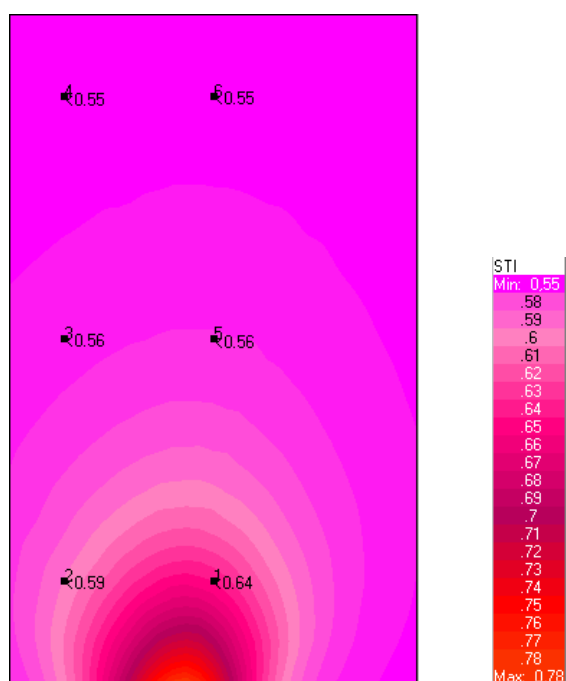


Figura 4.41: Valores de RASTI com ocupação total obtidos no EASE

Para uma ocupação total do anfiteatro, o valor médio obtido para o tempo de reverberação  $Tr[500-2kHz]$  foi de 1,24s e para o RASTI de 0,57.

Analisou-se ainda os valores destes parâmetros para uma ocupação média de 1/3 do anfiteatro tendo sido obtido o valor  $Tr[500-2kHz]$  de 1,78s e para o RASTI de 0,49.

#### 4.4 Comparação dos Valores Obtidos com Avaliação e Simulação Acústica

Para dar o modelo como calibrado e aceitá-lo como uma boa representação da realidade, será de seguida feita a comparação entre os resultados obtidos através da avaliação acústica do local com os valores obtidos por simulação.

Começando por analisar os resultados para o tempo de reverberação, é apresentada no gráfico 4.42 a comparação entre os valores obtidos *in loco* e os valores simulados.

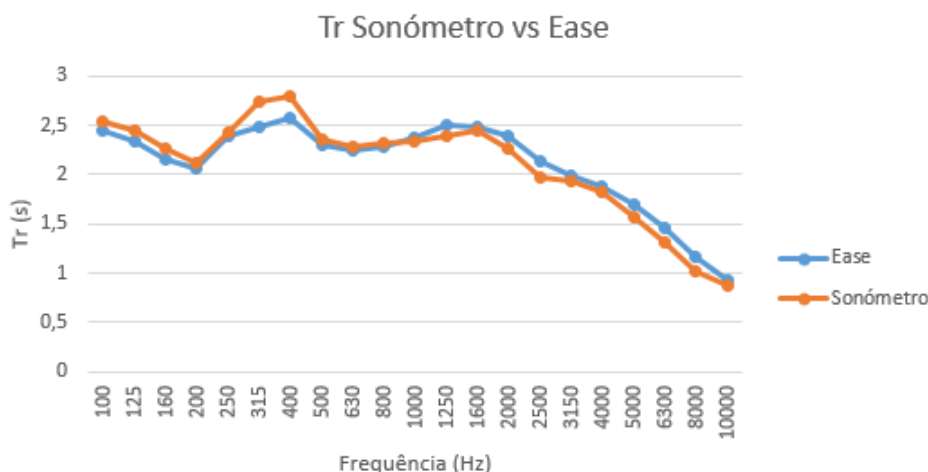


Figura 4.42: Comparação entre valores obtidos no local com o sonómetro e os valores simulados

Em relação aos valores obtidos para o RASTI, e observando as figuras 4.15 e 4.31, conclui-se que a diferença máxima de valores obtida entre a medição no local e o valor obtido por simulação é de 0,04.

Relativamente ao parâmetro claridade ( $C_{50}$ ), no ensaio no local foi obtido o valor -0,79 dB no lugar central da fila 2 e -4,51 dB na fila 6 e no Ease obtiveram-se -2,2 dB para o mesmo local da fila 2 e -4,9 dB na fila 6. A diferença máxima obtida foi -1,4 dB entre o valor medido e o valor simulado.

No geral, os valores simulados encontram-se próximos dos valores medidos no local permitindo um bom grau de confiança no modelo construído.

#### 4.5 Conclusões

Após a avaliação do espaço e a sua simulação acústica natural sem ocupação, e feita a análise dos resultados face ao esperado, conclui-se que o mesmo se apresenta acusticamente bastante pobre, pelo que surge uma clara necessidade de intervenção.

Foi ainda realizada a simulação do espaço em situações 1/3 e de plena ocupação, concluindo-se como esperado que os indicadores melhoram ligeiramente, contudo, sem alcançarem a gama de valores aceitáveis, sobretudo no parâmetro inteligibilidade (RASTI). Acresce que a esta melhoria deverá ainda ser associado um efeito negativo de aumento de ruído de ocupação.

Com o modelo calibrado, e tendo um bom grau de segurança no mesmo, é agora possível modificá-lo de modo a simular alterações no espaço de forma relativamente rápida e procurando satisfazer um critério de eficácia económica que será necessário para avaliar a viabilidade da implementação das soluções a desenvolver.





## Capítulo 5

# Reabilitação Acústica

Face aos resultados obtidos no capítulo anterior, concluiu-se a existência da necessidade de reabilitar o espaço acusticamente. Assim, neste capítulo, são apresentadas as possíveis hipóteses de intervenção num espaço e a sua aplicação ao caso de estudo. Irá ser utilizado o *software* EASE para a simulação das alterações propostas.

### 5.1 Princípios Orientadores da Intervenção

Após o estudo de um espaço, a compreensão do problema e a identificação dos possíveis aspetos a melhorar, propõe-se para a fase de intervenção o estudo de um conjunto de três valências. São estas a absorção controlada, a utilização de dispositivos pontuais de absorção e ainda o recurso a reforço sonoro em complemento aos anteriores. Estas soluções são utilizadas de forma combinada para obter valores para os parâmetros acústicos dentro da gama desejada permitindo assim otimizar a adaptação acústica da sala.

Relativamente à absorção controlada existe um conjunto de materiais e sistemas aos quais se pode recorrer para adaptar um espaço aos critérios dos parâmetros descritivos. Estes foram abordados em detalhe no capítulo 2 (na secção 2.1.6 Absorção sonora).

Além do uso fixo destes materiais em superfícies de tamanho e localização a definir, pode-se recorrer também a dispositivos pontuais com um determinado propósito utilizando placas de material absorvente ou difusor, ou ainda, utilizar materiais desenhados com o objetivo de melhorar a inteligibilidade de um espaço, como por exemplo, o cone acústico proposto por Per Brüel [38]. Este é normalmente colocado no teto e, tal como o nome indica, apresenta uma forma cónica e características materiais que ajudam a cumprir esse objetivo.

Por último, o recurso a reforço sonoro é útil nos casos em que a utilização dos materiais anteriormente referidos não provoca o efeito desejado na melhoria acústica por si só. Assim, existem sistemas que permitem aumentar a intensidade sonora, aumentar o tempo de reverberação e criar reflexões artificiais, sendo que estes estão por norma mais associados ao desenho acústico de grandes espaços.

## 5.2 Anfiteatro B013: Solução Proposta

### 5.2.1 Condicionamento Acústico e Respetiva Simulação

Terminada a fase de estudo e avaliação do anfiteatro B013, concluiu-se que este não apresenta os valores desejados para os parâmetros acústicos descritivos do espaço. Tendo em conta os resultados obtidos para os parâmetros estudados, e sendo estes influentes na qualidade da transmissão da palavra no espaço, propõe-se uma intervenção com recurso a materiais absorventes para assim diminuir o tempo de reverberação e melhorar o valor de RASTI,  $C_{50}$  e  $D_{50}$ . Esta solução é orientada para eliminar as reflexões tardias provocadas pela envolvente.

Fazendo o estudo das reflexões mais prejudiciais para o ouvinte através da refletometria (por experimentação e simulação), concluiu-se que um dos locais que mais contribui para o aparecimento de reflexões indesejadas é a parte do teto de maior dimensão e a parede traseira, pelo que será esta a zona alvo de intervenção.

Na escolha de materiais a aplicar na sala deverá ser tido em conta as suas:

- durabilidade
- sustentabilidade
- resistência (mecânica e ao fogo)
- facilidade de aplicação
- preço

Desta forma, foi feito um estudo dos materiais que trariam os resultados pretendidos, com uma aplicação fácil e custos pouco elevados. Apresentam-se de seguida, na tabela 5.1, os coeficientes de absorção para os mesmos, nomeadamente, massa porosa projetada (K13), cortiça e espuma flexível de poliuretano (Sonex) [1, 39].

Tabela 5.1: Coeficientes de absorção de diversos materiais

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
K13 25 mm (sobre caixa de ar)	0,47	0,90	1,10	1,03	1,05	1,03
K13 38 mm	0,15	0,51	0,95	1,06	0,99	0,98
Placas de aglomerado de cortiça com 4 cm	0,09	0,09	0,35	0,60	0,38	0,49
Espuma de poliuretano com 2,5 cm	0,16	0,25	0,45	0,84	0,97	0,87

Fazendo um breve estudo de mercado sobre o preço destes materiais, concluiu-se que o mais barato é a cortiça, depois o K13 e, finalmente, o mais caro é a espuma de poliuretano.

Assim, fazendo uma análise sobre qual o material que apresenta mais vantagens na relação entre coeficiente de absorção e custo, e ainda, tendo em conta as características desejadas referidas em cima para a escolha do material, concluiu-se que o mais atrativo é o K13.

Sendo a principal vantagem da utilização de um *software* de simulação a possibilidade de testar intervenções no espaço e o seu impacto sem construir, foram feitas alterações ao modelo

do anfiteatro colocando cortiça e K13 em diferentes locais de forma a concluir qual seria o mais vantajoso de utilizar. A espuma de poliuretano ficou excluída devido ao custo e resistência.

A partir da simulação testaram-se os dois materiais referidos anteriormente em diversas posições do espaço. Efetivamente o K13 provou ser o que traz mais vantagens quando colocado na zona traseira da sala, ou seja, parede de trás e parte traseira do teto (2,5 m de comprimento ao longo da largura do teto). Na figura 5.1 está representada esta intervenção na vista da sala em perspectiva através da simulação onde é possível observar a roxo a zona que foi revestida.

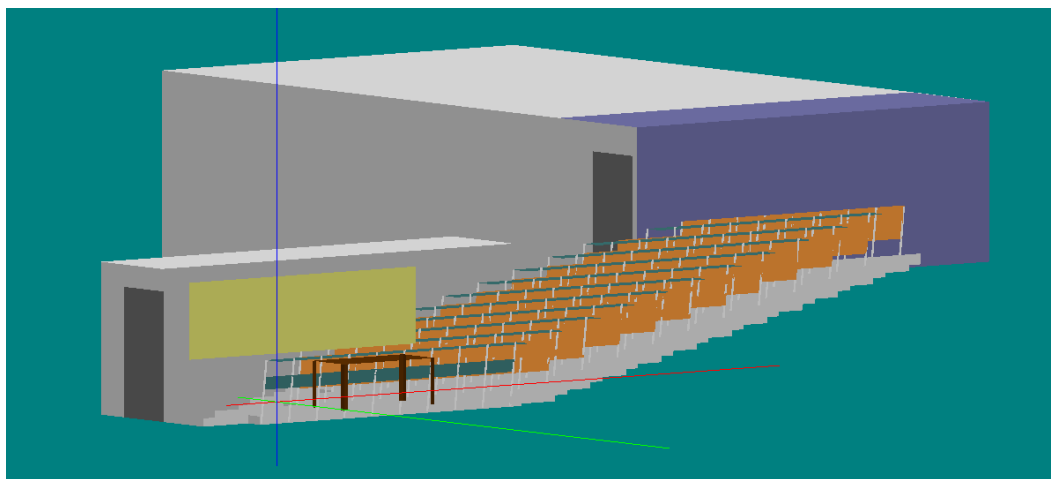


Figura 5.1: Anfiteatro B013 com aplicação de condicionamento acústico (em cor escura) na parede traseira e sua zona próxima do tecto e simulado em EASE

De seguida irão ser apresentados os valores alcançados para os parâmetros acústicos descritivos do espaço simulando esta intervenção. Na figura 5.2 e na tabela 5.2 são apresentados os novos valores obtidos para o tempo de reverberação após a intervenção e nas figuras 5.3 e 5.4 são apresentados em planta, respetivamente, os novos valores do RASTI e da  $C_{50}$ . Foi obtida a média de 0,61 para o RASTI e 0,43 dB para a  $C_{50}$ .

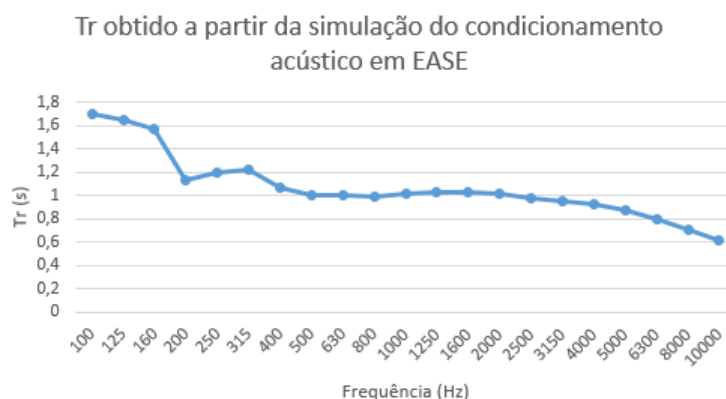


Figura 5.2: Tempo de reverberação obtido a partir da simulação do condicionamento acústico em EASE

Tabela 5.2: Tempo de reverberação obtido a partir da simulação do condicionamento acústico em EASE

Frequência (Hz)	Tr (s)
100	1,70
125	1,65
160	1,57
200	1,13
250	1,20
315	1,22
400	1,07
500	1,00
630	1,00
800	0,99
1000	1,02
1250	1,03
1600	1,03
2000	1,02
2500	0,98
3150	0,95
4000	0,92
5000	0,87
6300	0,80
8000	0,71
10000	0,61

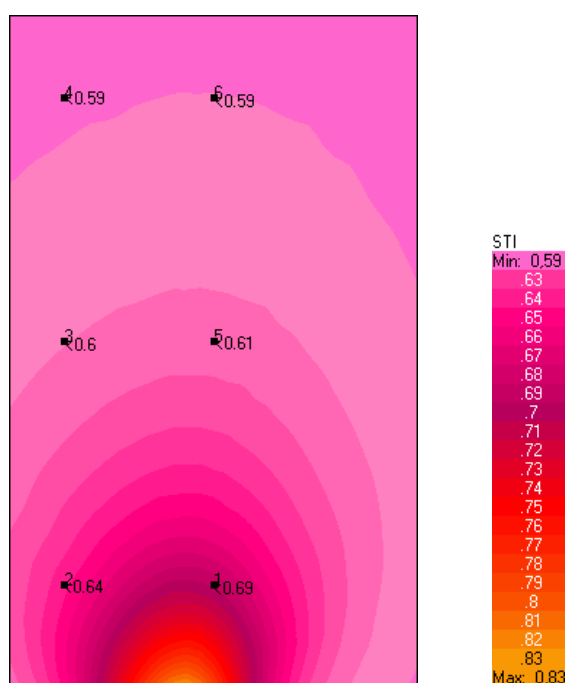


Figura 5.3: Valores de RASTI obtidos através da simulação do condicionamento acústico em EASE por meio do complemento de absorção

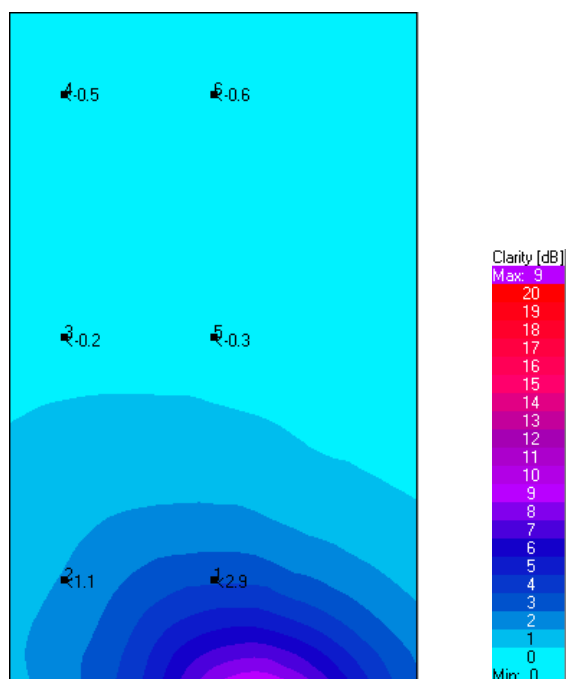


Figura 5.4: Valores de  $C_{50}$  obtidos através da simulação do condicionamento acústico em EASE por meio do complemento de absorção

### 5.2.2 Utilização Natural

A utilização de material corretivo permite melhorar a inteligibilidade do espaço, e foi com esse intuito que se fez o estudo anterior. No entanto, este poderá não ser suficiente.

O condicionamento acústico serve como meio para evitar reflexões indesejadas e melhorar o campo sonoro. No entanto, traz a consequência de provocar perda de energia sonora, uma vez que haverá maior absorção pelos materiais, o que diminui o nível médio de energia acústica no local.

Será agora importante calcular a pressão sonora com que o ouvinte irá receber o discurso produzido pelo orador, para assim perceber se o condicionamento acústico por si só apresenta os efeitos desejados.

Uma sala pode ser boa para fins de inteligibilidade, mas se o som direto não chegar ao ouvinte com a pressão necessária, então perde-se grande parte do efeito da correção aplicada, uma vez que o ouvinte terá dificuldade em ouvir o discurso, mesmo que a sala tenha condições para o tornar claro, porque persistirá o efeito sempre adverso do ruído de fundo e a sensibilidade auditiva limitada dos ouvintes.

Sabendo que os ouvintes da fileira central axial do anfiteatro estão a uma distância do orador que varia entre 2,80 m e 12,08 m, e assumindo que o orador produz um valor favorável de 70 dB a 1m, é possível calcular a pressão do som direto recebido pelos ouvintes através da expressão 2.16.

Assim, para o lugar central da última fila, calcula-se o valor da pressão sonora da seguinte forma:

$$L_{p(o)} = 70 - 20\log(12,08) = 48,36\text{dB} \quad (5.1)$$

Fazendo este cálculo para a posição central de todas as filas, obtêm-se valores de pressão sonora resultantes do som direto a variar entre 48,36 dB e 61,05 dB.

Sabendo que o ruído de fundo do anfiteatro em estudo é de 38,4 dBA, e sabendo ainda que é aconselhável um valor mínimo de sinal-ruído de 25 dB, a pressão sonora recebida pelos ouvintes proveniente do som direto deveria ser superior a 63,4 dB. Verifica-se portanto que, nos lugares traseiros do anfiteatro, o valor da pressão sonora recebida fica muito aquém do ideal. Desta forma, será importante aumentar o som direto recebido pelo ouvintes das filas traseiras para estes escutarem bem o que está a ser dito.

Recorrendo ao *software* EASE, foi feito o cálculo da pressão do som direto emitido pelo orador e recebido pelos ouvintes em todo o anfiteatro. Os valores obtidos podem ser observados na figura 5.5, sendo a média 53,33 dB.

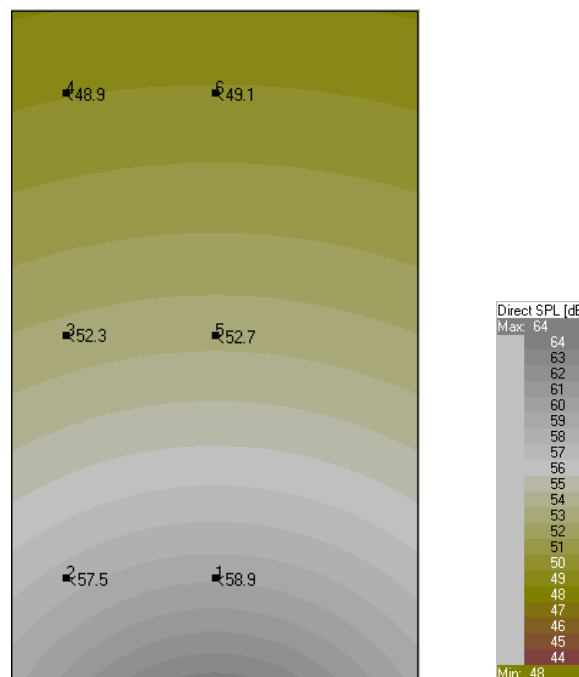


Figura 5.5: Pressão sonora recebida através do som direto com a utilização natural calculada por meio de simulação no EASE

Conclui-se assim que por vezes o condicionamento acústico não é suficiente por si só para cumprir o objetivo de obtenção de um espaço acusticamente eficiente .

### 5.2.3 Projeto da Instalação Sonora e Simulação Eletroacústica

Constatando, a partir de cálculos anteriores, que há necessidade de aumentar a pressão sonora recebida pelo ouvinte proveniente do som direto, propõe-se a utilização de reforço sonoro.

Para o projeto do reforço sonoro será importante uma compreensão teórica de alguns conceitos envolvidos neste processo, pelo que se remete a atenção para o capítulo 2.6.2.

Iniciando o processo de desenho de um reforço sonoro para o anfiteatro B013, considerou-se que um orador colocado atrás da mesa do professor produz um valor favorável de pressão de 70 dB a 1 metro.

Para o cálculo dos ganhos acústicos máximo e mínimo a obter com este sistema é necessário conhecer alguns dados, nomeadamente distâncias e ângulos. As figuras 5.6 e 5.7 representam a distribuição geométrica típica dos pontos de interesse na sala para este estudo em alçado longitudinal.

Assim, é preciso calcular a distância e ângulo do orador ao altifalante ( $d_1$ ), do altifalante ao lugar mais afastado da audiência ( $d'_2$ ) e ao lugar mais próximo ( $d''_2$ ).

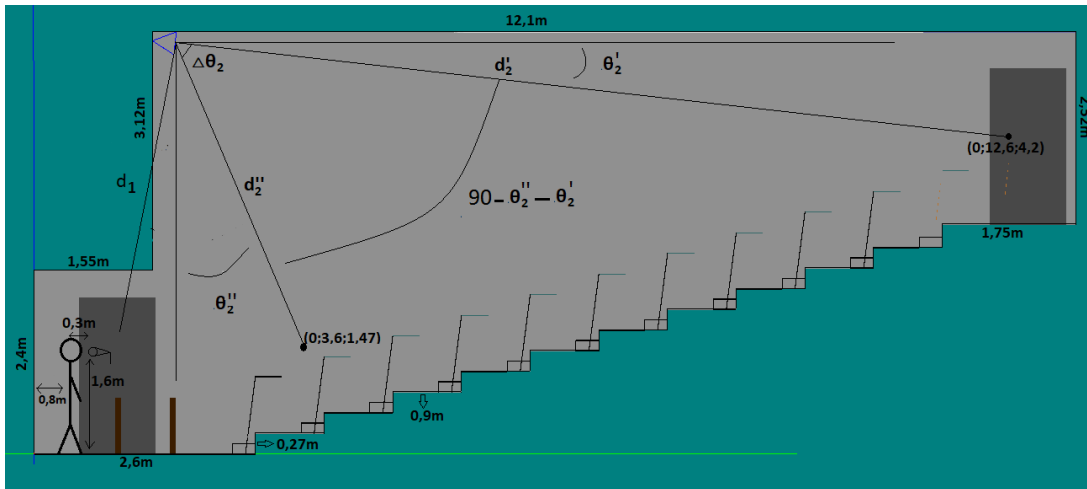


Figura 5.6: Reforço sonoro

Cálculo de  $d_1$ :

$$d_1 = \sqrt{(1,55 - 1,1)^2 + (5,52 - 1,6)^2} = \sqrt{0,45^2 + 3,92^2} = 3,95m \quad (5.2)$$

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{0,45}{3,92}\right) = 6,55^\circ \quad (5.3)$$

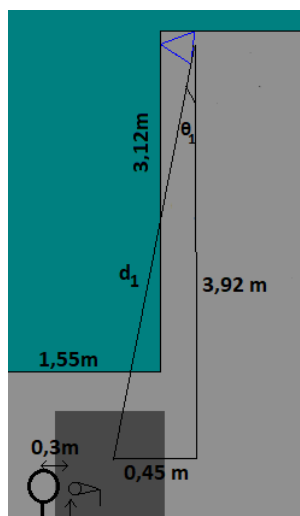


Figura 5.7: Figura auxiliar para o cálculo de  $d_1$  e  $\theta_1$

Cálculo de  $d'_2$ :

$$d'_2 = \sqrt{11,05^2 + 1,32^2} = 11,13m \quad (5.4)$$

$$\theta'_2 = \arctg\left(\frac{1,32}{11,05}\right) = 6,8^\circ \quad (5.5)$$

Cálculo de  $d''_2$ :

$$d''_2 = \sqrt{4,05^2 + 2,05^2} = 4,54m \quad (5.6)$$

$$\theta''_2 = \arctg\left(\frac{2,05}{4,05}\right) = 26,85^\circ \quad (5.7)$$

Cálculo de  $\Delta\theta_2$ :

$$\Delta\theta_2 = 90^\circ - 26,85^\circ - 6,8^\circ = 56,35^\circ \quad (5.8)$$

### Ganho acústico

$$AG = 20\log\frac{d_o \cdot d_1}{d_s \cdot d_2} - D_a(\theta_a) - D_m(\theta_m)$$

$$\begin{cases} AG_{max} = 20\log\frac{d_o \cdot d_1}{d_s \cdot d_2} - D_a(\theta_a) - D_m(\theta_m) - 6dB \\ AG_{min} = 20\log d_o - 20\log(EAD_{max}) \end{cases} \quad (5.9)$$

Tendo em conta que o ângulo vertical entre a primeira e última fila, representado por  $\Delta\theta_2$ , é  $56,35^\circ$ , e o ângulo máximo horizontal entre o lugar central e os lugares das extremidades é  $26^\circ$ , escolheu-se utilizar um altifalante com o diagrama de diretividade da figura 5.8. A azul está



representada a perda de pressão acústica em função do ângulo vertical, e a vermelho em função do ângulo horizontal.

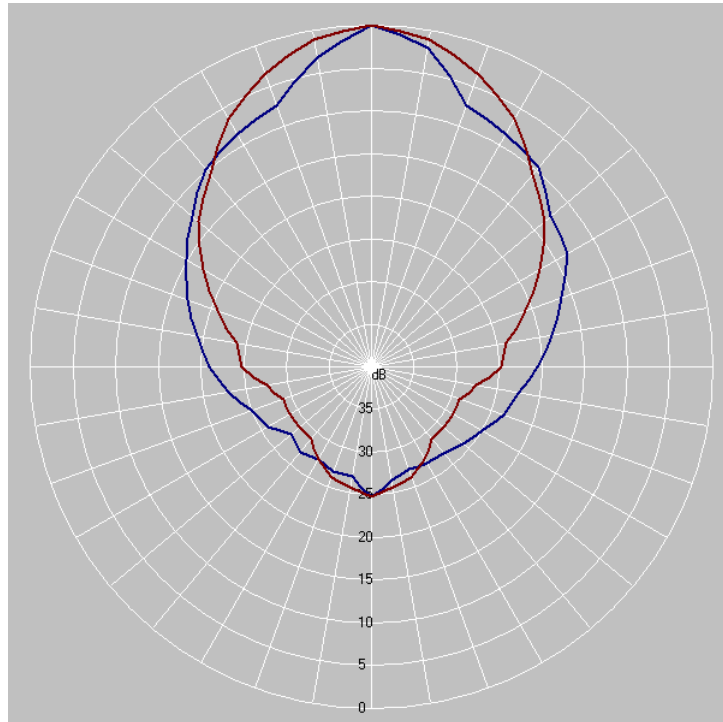


Figura 5.8: Diagrama de diretividade de um altifalante Electro-Voice MH6040c

Assim, para um ângulo de  $89,75^\circ$  ( $56,35^\circ + 26,85^\circ + 6,55^\circ$ )  $\simeq 90^\circ$  entre os eixos do altifalante e do microfone:

$$D_a(90^\circ) = -21 \text{ dB}$$

Assumindo o uso de um microfone do tipo cardióide com a característica direcional:

$$E = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta) \quad (5.10)$$

E considerando que recebe a pressão do altifalante a aproximadamente  $90^\circ$ , a sua saída é dada por  $20\log(0,5(1 + \cos(90^\circ))) = -6 \text{ dB}$  relativamente à do eixo:

$$D_m(90^\circ) = -6 \text{ dB}$$

Na realidade, a situação será ainda mais favorável devido à existência de uma parede vertical que difracta o som produzido pelo altifalante que chega ao microfone.

Considerando que a distância entre o orador e o ouvinte da última fila é 12,08 m, que entre o altifalante e o microfone é 4 m, que entre o orador e o microfone é 0,3 m e que entre o altifalante

e o ouvinte é 11,13 m, assumindo ainda uma margem de estabilidade de 6dB, é possível calcular o ganho acústico da seguinte forma:

$$\begin{cases} AG_{max} = 20\log\left(\frac{12,08,4}{0,3,11,13}\right) - (-21) - (-6) - 6 = 44,21dB \\ AG_{min} = 20\log(12,08) - 20\log(2,14) = 15dB \end{cases} \quad (5.11)$$

sabendo que:

$$EAD_{max} = 10^{\frac{70-25-38,4}{20}} = 2,14m \quad (5.12)$$

A margem de segurança é de  $44,21-15=29,21$  dB

### Estudo da cobertura e traçado de pressão sonora máxima recebida pela audiência

Para o cálculo da pressão sonora recebida em cada uma das 98 posições da sala propõe-se a seguinte metodologia [40]:

- Cálculo da contribuição direta do orador a partir de  $L_{p(o)}=L_{p(o)}(1m)-20\log(d_o)=70-20\log(d_o)$
- Cálculo da contribuição do altifalante, que depende do seu diagrama de diretividade horizontal( $\Delta LI(\Delta\theta)$ ) e vertical( $\Delta LI(\Delta\phi)$ ), da pressão sonora produzida pelo altifalante a 1m, e ainda, da distância entre o altifalante e o ouvinte. Assim, o cálculo efetuado é dado por  $L_{p(a)}=L_{p(a)}(1m)-\Delta LI(\Delta\theta)-\Delta LI(\Delta\phi)-20\log(d_2)$ . Sendo que  $L_{p(a)}(1m)=84,32$  dB obtido a partir da equação 2.17
- Cálculo do nível de pressão sonora produzida pelo som direto do orador e do altifalante a partir de  $L_{soma}=10\log\left(10^{\frac{L_{p(o)}}{10}}+10^{\frac{L_{p(a)}}{10}}\right)$

Para o caso deste anfiteatro B013, tendo em conta que há lugares que recebem o som direto do altifalante primeiro do que o som do orador devido à diferença de distância do orador e do altifalante, será necessário introduzir um atraso de 5 ms no som produzido pelo altifalante para que o primeiro som recebido pelo ouvinte seja o do orador. Assim, com a introdução deste atraso, a diferença temporal entre o som recebido pelo ouvinte produzido pelo orador e pelo altifalante têm uma diferença máxima de aproximadamente 10 ms, o que assegura a sua coerência percetiva dos pontos de vista da precedência e do sinal de fala.

No anexo E pode encontrar-se a folha de cálculo da pressão sonora recebida por cada ouvinte através do som produzido pelo orador e pelo reforço sonoro.

Recorrendo novamente ao *software* EASE, é possível simular a influência da introdução de reforço sonoro num espaço. Assim, os valores de pressão sonora recebida através do som direto para cada ouvinte após esta intervenção estão representados na figura 5.9.

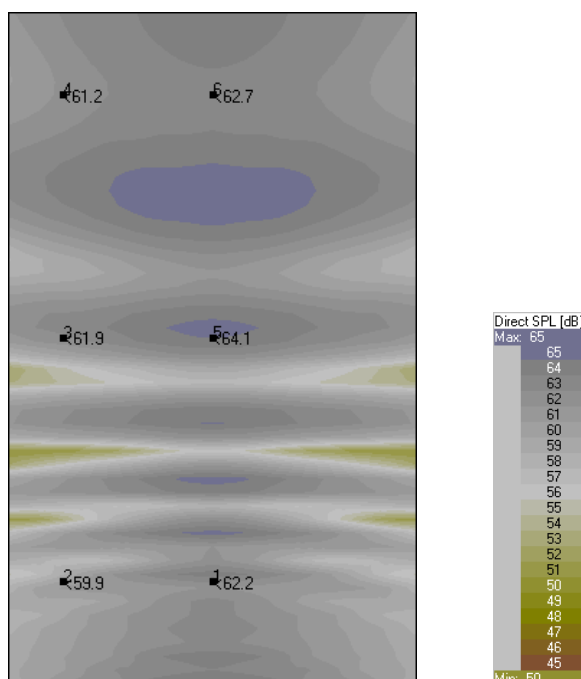


Figura 5.9: Pressão sonora recebida pelo som direto com reforço eletroacústico simulado em EASE

Através dos cálculos anteriores, foi obtida uma média de 61,3 dB de pressão sonora recebida pelos ouvintes através do som direto e, pela simulação obteve-se o valor médio de 60,79 dB. Constata-se que a diferença entre os dois resultados é inferior a 1 dB. Para os pontos analisados, a dispersão máxima de valores é de aproximadamente 3,6 dB para a experimentação e de 3,31 dB para a simulação.

O nível de pressão sonora total, por adição dos valores direto e reverberante através do EASE está representado na figura 5.10.

Relativamente ao nível de pressão sonora total foi obtida uma média de 72 dB e uma dispersão máxima de valores de 0,2 dB para os pontos analisados.

Após o desenho do reforço sonoro a introduzir no espaço, é proposta na figura 5.11 a montagem da cadeia de áudio a utilizar. Esta consiste na utilização de um microfone de lapela para o orador, permitindo assim o maior conforto e liberdade de movimento, um transmissor (Tx), um recetor (Rx), um pré-amplificador digital com introdução de atraso (Preamp) e um altifalante amplificado. O pré-amplificador poderá ainda receber instruções através do computador da sala via LAN ou de outras entradas representadas na figura.

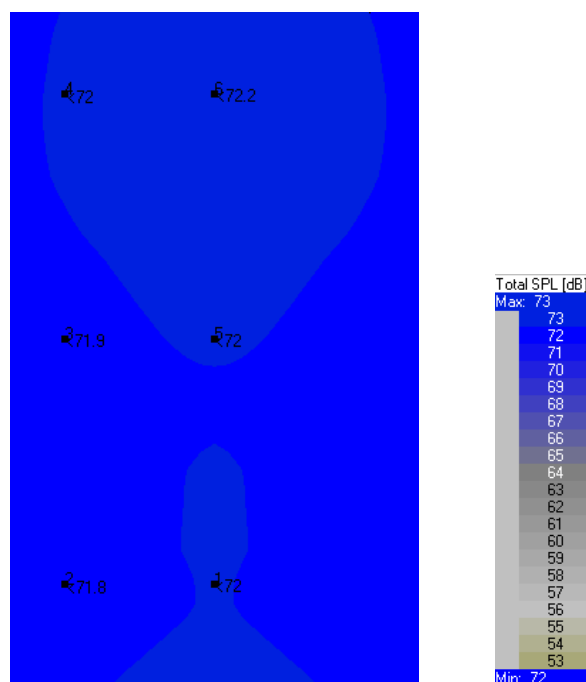


Figura 5.10: Pressão sonora total simulada em EASE

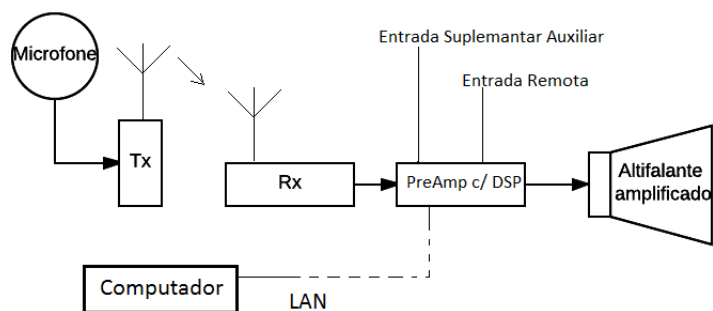


Figura 5.11: Cadeia de áudio proposta para o reforço sonoro no anfiteatro B013

Nas figuras 5.12 e 5.13 são apresentados respetivamente os novos valores obtidos para o RASTI e a  $C_{50}$  após a intervenção através do condicionamento acústico e do reforço sonoro. O valor médio para o RASTI obtido após a intervenção é de 0,6 e para a  $C_{50}$  é de 0,36 dB.

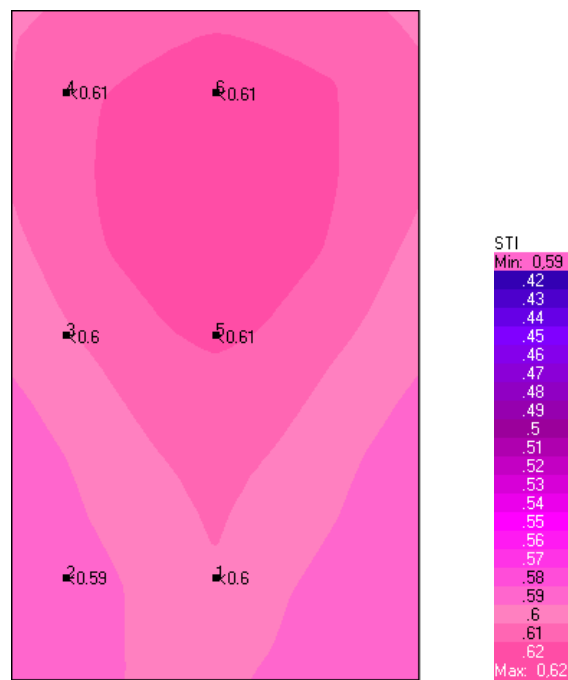


Figura 5.12: RASTI com condicionamento acústico e reforço eletroacústico obtido com o EASE

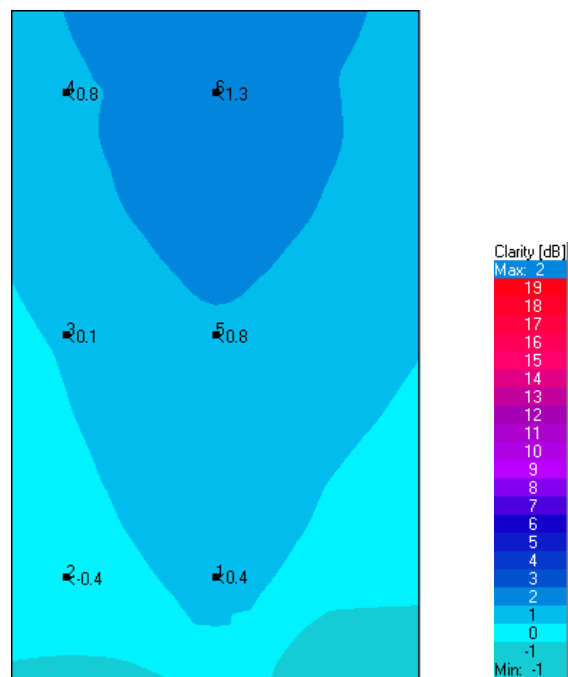


Figura 5.13:  $C_{50}$  com condicionamento acústico e reforço eletroacústico obtido com o EASE

#### 5.2.4 Espaço Antes e Após a Intervenção

Na figura 5.14 é apresentada uma representação do anfiteatro B013 antes e após a intervenção. A roxo é identificada a área onde foi colocado material absorvente K13 e a azul o altifalante.

Fazendo agora uma análise aos resultados obtidos com a intervenção acústica e eletroacústica

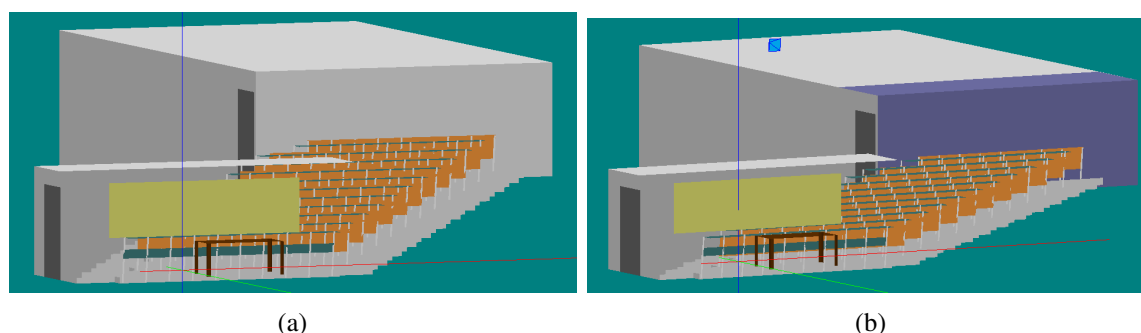


Figura 5.14: (a) B013 antes da intervenção no EASE; (b) B013 após intervenção

a partir da simulação, conclui-se que o valor do tempo de reverberação diminuiu entre 0,31 s e 1,51 s. Os valores obtidos antes e após a intervenção estão representados na figura 5.15. Para a gama de frequências da fala (170-4000 Hz) conseguiu diminuir-se o tempo de reverberação para valores que variam aproximadamente entre 1 e 1,5 s, o que apesar de ainda não estar dentro da gama ideal, já representa uma melhoria muito significativa com custos moderados.

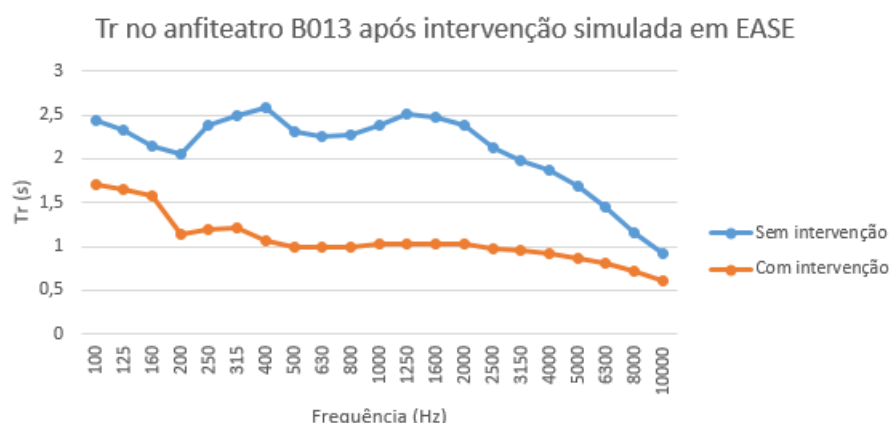


Figura 5.15: Comparação entre valores de Tr ( $T_{30}$ ) obtidos antes e após intervenção com o EASE

Relativamente ao RASTI, conclui-se que houve uma melhoria deste parâmetro do valor médio de 0,43 para 0,6, elevando assim a sua classificação subjetiva de fraca para boa, segundo a tabela de classificação apresentada em 2.1.

O parâmetro claridade ( $C_{50}$ ) sofreu uma melhoria de valores de -4,28 dB para 0,36 dB, estando assim dentro da gama adequada.

Observando ainda a alteração de reflexões provocadas pela envolvente através da simulação, notou-se uma perda significativa de intensidade em algumas das reflexões mais prejudiciais.

Uma vez que o *software* utilizado apresenta a funcionalidade da auralização, descrita na secção 2.7, foi verificada através de uma avaliação subjetiva por parte da autora, uma melhoria do som recebido resultante da intervenção ao espaço. Para este processo escolheu-se o lugar central da fila 6, e através da auralização escutou-se o som antes e após o condicionamento acústico com recurso a uma gravação vocal já existente no EASE em ambiente anecóico.

À semelhança do capítulo anterior, foi ainda feito o estudo do impacto da ocupação do anfiteatro através dos valores simulados do tempo de reverberação e do RASTI. Após a intervenção e com a ocupação total do espaço foram obtidos valores de  $Tr[500-2kHz]$  de 0,73s e para o RASTI de 0,67. O SPL total obtido foi de 70,38 dB. Para uma ocupação média de 1/3 foi obtido o valor de 0,89s para o  $Tr[500-2kHz]$ , 0,63 para o RASTI e 71,26 dB para o SPL total.

Foi assim possível alcançar uma melhoria substancial dos valores obtidos para os parâmetros acústicos, sem a necessidade de uma intervenção muito extensa ou dispendiosa, mas que se prova eficaz através da simulação.





## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Satisfação dos Objetivos e Conclusões

Com o intuito de intervir na problemática da acústica em espaços fechados, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar um espaço de aulas da FEUP, e caso se confirmassem os anteriores estudos que sem exceção apontam para ser insuficiente a qualidade acústica do espaço, estudar e propor soluções para a melhoria do mesmo por uso de técnicas acústicas e eletroacústicas.

Assim, foi apresentada uma metodologia de estudo, avaliação e desenho acústico de espaços de aula para desenho de raiz e desenho corretivo.

O espaço estudado foi o anfiteatro B013, que foi submetido a uma avaliação experimental e simulado computacionalmente, com o intuito de obter pelas duas vias os parâmetros acústicos descritivos do mesmo. A partir desta avaliação constatou-se que os valores se encontram muito aquém do desejado e recomendado. Através da experimentação foi obtido para o tempo de reverberação ([500-1kHz]) o valor médio de 2,42 s sendo o recomendado inferior a 0,8 s. Para o RASTI obteve-se o valor médio de 0,45 quando o mínimo deveria ser 0,6. Face aos resultados obtidos surgiu uma clara necessidade de intervenção.

Uma vez que os valores obtidos através do *software* foram próximos dos obtidos pela experimentação, utilizou-se o modelo computacional para a simulação de modificações ao espaço pois obtêm-se resultados rapidamente, sem intervenção física nem custos adicionais.

Deste modo, após o estudo de várias opções, propõe-se uma intervenção baseada numa duplicidade entre a utilização de material absorvente, K13, aplicado na zona traseira da sala, e de um sistema de reforço sonoro como complemento. Através de um compromisso entre a otimização da acústica do espaço e o preço, foi possível alcançar uma diminuição do tempo de reverberação ([500-1kHz]) simulado de 2,39 s para 1,02 s, e um aumento do valor de RASTI para 0,6. Foram ainda analisados os valores do  $D_{50}$  e  $C_{50}$  que resultaram igualmente otimizados.

De notar que se o fator preço não tivesse sido tido em conta, esta otimização poderia ser ainda melhor. Caso no futuro essa intervenção seja possível, esta poderá ser cumulativa à proposta apresentada e não uma substituição da mesma com a consequente poupança. Por exemplo, estender a

área de aplicação do material absorvente para zonas ainda não intervencionadas, acarretaria apenas um custo adicional.

Assim, os objetivos propostos para este trabalho foram atingidos e superados, alcançando o desenho de um espaço adaptado à sua finalidade com preços de implementação minimizados.

## **6.2 Trabalho Futuro**

Após o estudo desenvolvido, e como proposta de trabalho futuro, seria ainda possível aumentar o grau de detalhe do mesmo através da calibração dos modelos não só para o espaço vazio como foi feito, mas também com experimentação, como por exemplo, ao nível do ruído com ocupação.

De forma a tornar a avaliação do espaço mais completa seria possível introduzir a este estudo a realização de testes subjetivos com recurso a um painel de indivíduos.

Relativamente ao reforço sonoro proposto nesta dissertação, este centra-se em aumentar o nível sonoro recebido pela audiência mas fica por estudar uma possível utilização de mais meios eletroacústicos para solucionar o problema de se ouvir um orador da assembleia. Este surge porque a comunicação de um espaço de aulas não é unidirecional, pelo que existe intervenção por parte dos ouvintes, sendo importante garantir que as suas palavras são ouvidas pelo resto da audiência e orador. Caso existam ouvintes com dificuldades auditivas seria ainda possível estudar e aplicar um sistema de reforço individual para o mesmo.

A aplicação desta proposta está dependente da aprovação e disponibilização de meios pela FEUP. Não só fica por aplicar este trabalho ao anfiteatro estudado e aos seus semelhantes, como também seria importante fazer o estudo de outros espaços de aula com défice acústico e a respetiva intervenção.

## Anexo A

# Capacidade vs Qualidade Acústica de Espaços de Aula da FEUP

	Anfiteatro grande	Anfiteatro médio			Salas normais		
Sala exemplo	B002	B023	B018	B027	B221	B334	B333
Nº de lugares	184	98	60	53	89	40	21
Volume ( $m^3$ )	607	349	169	173	456	192	134
Nº de salas	3	13	8	10	3	17	17
Nº de salas x nº lugares	552	1274	480	530	267	680	357
RASTI	0,41	0,45	0,5	0,5	0,48	0,5	0,5
Tr médio [500-2k Hz] s	3	2,3	1,7	1,7	2,2	1,9	1,8

\*Estes dados foram obtidos a partir de uma dissertação realizada em 2013 com o intuito de avaliar vários espaços de aula da Feup [27]. Atualmente a sala B333 já não existe pelo que os seus dados não foram considerados.



## Anexo B

# Código Matlab

### B.1 Cálculo do Tempo de Reverberação

#### B.1.1 Desenvolvimento do Programa em Matlab

Para permitir uma maior autonomia no cálculo do tempo de reverberação, ou seja, de forma a não depender do sonómetro, foi desenvolvido um programa no *software* Matlab que permite calcular o Tr. Assim, tendo uma fonte sonora a emitir um sinal, o mesmo é captado diretamente pelo computador ou por microfones externos sem necessidade de calibração.

A figura B.1 apresenta um diagrama de blocos ilustrativos das etapas seguidas para fazer o processamento do sinal e para realizar o cálculo desejado.

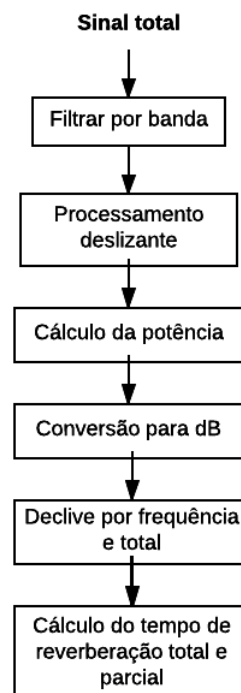


Figura B.1: Etapas para o cálculo do tempo de reverberação

Assim, neste *software*, após leitura do sinal adquirido no PC (exemplo de sinal no processo de fonte interrompida no anexo B.6) é feita uma divisão do mesmo em sub-bandas de terço de oitava (entre 50 Hz e 5000 Hz) para poder obter os diferentes resultados do tempo de reverberação nas diferentes sub-bandas de frequências. Para esta filtragem, recorreu-se a um filtro butterworth.

Posteriormente, e para cada sub-banda, é feita uma análise deslizante do sinal, sendo este dividido em intervalos de 30 ms com passo de 10 ms utilizando um janelamento de hanning com sobreposição de 2/3, para assim ser possível observar o seu decaimento em potência ao longo do tempo.

Finalmente, sobrepôs-se aos valores da análise deslizante na região de decaimento um modelo de regressão linear de cujo o declive se calcula o  $T_{30}$ .

O programa desenvolvido é constituído por três funções. Uma principal que gere todo o programa, outra que divide o sinal em janelas de 30ms com passo de 10 ms fazendo uma análise deslizante e ainda uma terceira para desenhar cada filtro de banda de terço de oitava.

No anexo B.1.2,B.1.3 e B.1.4 encontra-se a listagem do código desenvolvido.

## B.1.2 Função Principal

```
[t,Fs] = audioread('tr4_028cortado.wav');
N = 3;      % Ordem do filtro.
F = [50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600
     2000 2500 3150 4000 5000 ]; %Bandas de terço de oitava
m = length(t);
num1=round(m/(0.01*Fs))-3;
P=zeros(0,21);
Pdb=zeros(0,21);
y=zeros(m,21);
win=zeros(num1,21);
f=zeros(1,21);

for i=1:1:21 %Filtragem por bandas de terço de oitava
    [B,A] = dsgn(F(i),Fs,N);
    y(:,i) = filter(B,A,t);
    q=y(:,i);
    win(:,i)=window(q); %Chamar função para análise deslizante
    P(i) = sum((y(:,i)).^2)/m;
    Pdb(i) = mag2db(P(i))/2;
    figure(i);
    bar(win(:,i));
end
```

```

%Modelo de regressão linear e cálculo do tempo de reverberação
begin=1930;
l=2150;
reta=zeros((l-begin)+1,21);
d=zeros(1,21);
for i=1:1:21
    figure(24);
    [slope,intercept,r] = postreg(win(begin:l,i),(begin:l)');
    reta(:,i)=(slope.*(begin:l)')+intercept);
    d(:,i)=length(reta(:,i));
    for u=1:1:d(1,i)
        if reta(u,i)<reta(1,i)-30
            f(1,i)=((u-1)*0.01)*2;
            break;
        end
    end
end
end

```

### B.1.3 Desenho do Filtro de Banda de Terço de Oitava

```

function [B,A] = dsgn(Fc,Fs,N)
f1 = Fc/(2^(1/6));
f2 = Fc*(2^(1/6));
W1=f1/(Fs/2);
W2=f2/(Fs/2);
[B,A] = butter(N,[W1,W2]);

```

### B.1.4 Análise Deslizante

```
function win=window(q)
[t,Fs] = audioread('tr4_028cortado.wav');
Ns=0.03*Fs;    %Definir a janela de 30ms
p=0.01*Fs;    %Definir o passo de 10ms
m=length(t);
num=round(m/(0.01*Fs))-3;
samples=zeros(Ns,1);
samp=zeros(Ns,num);
T=zeros(1,num);
Tdb=zeros(num,1);
win=zeros(num,1);

for n=0 : num    %Dividir cada sinal de acordo com a janela e o passo
    samples=(n*p)+1:(Ns+(n*p));
    samp(:,n+1)= q(samples);
    w=hann(length(samp(:,n+1))); % hanning
    samp(:,n+1)=samp(:,n+1).*w;
end
for n=1:num    %Calculo da energia(em dB) para cada janela
    T(n)= sum((samp(:,n)).^2)/Ns;
    Tdb(n)= mag2db(T(n))/2;
    win(n)=Tdb(n);
end
bar(win);
```



## B.2 Cálculo do Parâmetro Definição

Os programas desenvolvidos para medição da definição, da claridade e da ETC aplicam-se à resposta impulsional (exemplo de sinal no processo de resposta impulsional no anexo B.6).

```
[audio,Fs] = audioread('impulsoresposta_salavazia_cortado.wav');
audiofila2=audio(:,1);
audiofila6=audio(:,2);
[pks2,locs2] = findpeaks(audiofila2,'MinPeakDistance',2.8*Fs,'MinPeakHeight',0.2);
[pks6,locs6] = findpeaks(audiofila6,'MinPeakDistance',2.8*Fs,'MinPeakHeight',0.1);
t50 = round(0.05*Fs);
total=round(2.8*Fs);
E50fila2=zeros(1,length(locs2)-1);
Efila2=zeros(1,length(locs2)-1);
D50fila2=zeros(1,length(locs2)-1);
E50fila6=zeros(1,length(locs6)-1);
Efila6=zeros(1,length(locs6)-1);
D50fila6=zeros(1,length(locs6)-1);

for x=0:1:length(pks2)-1    %Cálculo de D50 para cada impulso na fila 2
    p2=locs2(x+1);
    E50fila2(x+1)=sum((audiofila2(p2:(p2+t50))).^2);
    Efila2(x+1) = sum((audiofila2(p2:(p2+total))).^2);
    D50fila2(x+1)= E50fila2(x+1)/Efila2(x+1);
end

for x=0:1:length(pks6)-1    %Cálculo de D50 para cada impulso na fila 6
    p6=locs6(x+1);
    E50fila6(x+1)=sum((audiofila6(p6:(p6+t50))).^2);
    Efila6(x+1) = sum((audiofila6(p6:(p6+total))).^2);
    D50fila6(x+1)= E50fila6(x+1)/Efila6(x+1);
end

D50fila2_media=sum(D50fila2)/length(D50fila2);    %Média de D50 para os 100 impulsos na fila 2
D50fila6_media=sum(D50fila6)/length(D50fila6);    %Média de D50 para os 100 impulsos na fila 6
```

## B.3 Cálculo do Parâmetro Claridade

```
c50fila2=10*log10(D50fila2_media/(1-D50fila2_media));    % C50 na fila 2
c50fila6=10*log10(D50fila6_media/(1-D50fila6_media));    % C50 na fila 6
```

## B.4 Código para Visualização da Resposta Impulsional

```
[audio,Fs] = audioread('penultimoimpulso.wav');  
audio=audio(:,1);  
audiodb=20*log10(audio);  
figure(8);  
t=(0:1:length(audiodb)-1)/Fs;  
plot(t,audiodb);
```

## B.5 Cálculo da ETC

```
[audio,Fs] = audioread('penultimoimpulso.wav');  
audio=audio(:,1);  
audio_analit = hilbert(audio);  
mod=abs(audio_analit);  
moddb=20*log10(mod);  
t2=(0:1:length(moddb)-1)/Fs;  
figure(8);  
plot(t2,moddb);
```

## B.6 Formas de Onda do Sinal Acústico

Nas figuras B.2 e B.3 podem observar-se exemplos de formas de onda do sinal acústico no processo de fonte interrompida e no processo de resposta impulsional.

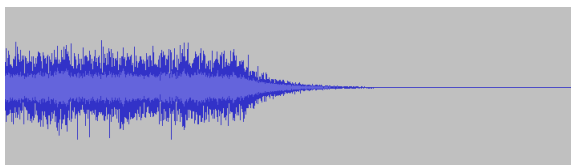


Figura B.2: Sinal acústico no processo de fonte interrompida

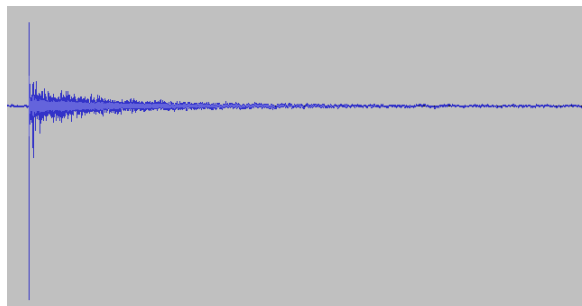


Figura B.3: Sinal acústico no processo de resposta impulsional

## Anexo C

# Ruído de Fundo no Anfiteatro B013

Tabela C.1: Ruído de fundo (dB) por terços de oitava no anfiteatro B013

Frequência (Hz)	Ruído de fundo (dB)
12,5	37,9
16	40,5
20	38,3
25	48,1
31,5	41,5
40	36,6
50	38,7
63	36,4
80	37,7
100	37,9
125	34,5
160	35,5
200	33,5
250	33
315	34
400	34,9
500	33,9
630	31,4
800	28,7
1000	25,8
1250	25,1
1600	23,8
2000	22,3

Frequência (Hz)	Ruído de fundo (dB)
2500	21,8
3150	20,5
4000	17,8
5000	14,2
6300	13,6
8000	12,4
10000	12,2
12500	12,8
16000	14,4
20000	17

## Anexo D

# Coeficientes de Absorção dos Materiais do Anfiteatro B013

Tabela D.1: Coeficientes de absorção dos materiais do anfiteatro B013

Frequência (Hz)	$\alpha_{banco}$	$\alpha_{mesa}$	$\alpha_{prumo}$
160	0	0,01	0,12
200	0	0,02	0,17
250	0	0,15	0
315	0	0	0,30
400	0	0,03	0,09
500	0	0,09	0,01
630	0,03	0	0,02
800	0,02	0	0,11
1000	0	0,10	0,01
1250	0,01	0,10	0,04
1600	0,03	0	0,07
2000	0	0,01	0,09
2500	0	0,10	0,08
3150	0	0,18	0,06
4000	0	0,07	0
5000	0	0,16	0
6300	0	0,26	0
8000	0	0	0
10000	0	0,25	0



## Anexo E

### Cálculo do Reforço Sonoro (Excel)

O lugar 0 representa o lugar central de uma fila e o lugar 4 o lugar numa das extremidades, havendo simetria em torno da fila central.

Fila/Lugar	$d_o(m)$					$L_{p(o)}(dB)$					Ângulo horizontal $\theta(^{\circ})$				
	4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	4	3	2	1	0
1	3,56	3,25	3,01	2,86	2,80	58,96	59,76	60,43	60,88	61,05	25,87	19,99	13,63	6,91	0,00
2	4,31	4,05	3,86	3,74	3,70	57,32	57,84	58,26	58,53	58,63	24,66	19,00	12,93	6,55	0,00
3	5,12	4,90	4,75	4,65	4,62	55,82	56,19	56,47	56,65	56,71	22,90	17,58	11,93	6,03	0,00
4	5,96	5,78	5,65	5,57	5,54	54,49	54,76	54,96	55,08	55,13	20,95	16,02	10,84	5,47	0,00
5	6,83	6,68	6,56	6,49	6,47	53,31	53,51	53,66	53,75	53,78	19,03	14,50	9,78	4,93	0,00
6	7,72	7,58	7,48	7,42	7,40	52,25	52,40	52,52	52,59	52,61	17,26	13,12	8,83	4,44	0,00
7	8,62	8,50	8,41	8,35	8,33	51,29	51,42	51,51	51,56	51,58	15,69	11,90	7,99	4,02	0,00
8	9,53	9,41	9,33	9,28	9,27	50,42	50,52	50,60	50,64	50,66	14,32	10,84	7,27	3,65	0,00
9	10,44	10,34	10,26	10,22	10,20	49,63	49,71	49,77	49,81	49,82	13,12	9,92	6,65	3,34	0,00
10	11,36	11,26	11,19	11,15	11,14	48,90	48,97	49,02	49,05	49,06	12,09	9,12	6,11	3,06	0,00
11	12,28	12,19	12,13	12,09	12,08	48,22	48,28	48,33	48,35	48,36	11,18	8,44	5,65	2,83	0,00

Fila/Lugar	$\Delta L_i(\Delta\theta)(dB)$					$\Delta L_i(\Delta\Phi)(dB)$	$d_2(m)$					$L_{p(a)}(dB)$				
	4	3	2	1	0	0	4	3	2	1	0	4	3	2	1	0
1	-5	-4	-2	-1	0	-14	5,04	4,83	4,67	4,57	4,54	51,26	52,64	54,93	56,12	57,18
2	-5	-4	-2	-1	0	-11	5,28	5,07	4,92	4,83	4,79	53,87	55,22	57,48	58,65	59,70
3	-5	-4	-2	-1	0	-9	5,66	5,46	5,32	5,24	5,21	55,27	56,57	58,79	59,94	60,98
4	-4	-3	-1	0	0	-8	6,16	5,98	5,85	5,78	5,75	56,53	57,78	59,97	61,09	61,13
5	-4	-3	-1	0	0	-8	6,75	6,59	6,48	6,41	6,38	55,73	56,94	59,09	60,19	60,22
6	-3	-2	-1	0	0	-5	7,42	7,27	7,17	7,11	7,08	58,91	60,08	61,21	62,29	62,31
7	-3	-2	-1	0	0	-4	8,14	8,01	7,91	7,86	7,84	59,11	60,25	61,35	62,42	62,44
8	-3	-1	-1	0	0	-3	8,90	8,78	8,69	8,64	8,62	59,33	61,45	61,53	62,59	62,60
9	-2	-1	-1	0	0	-2	9,69	9,58	9,50	9,46	9,44	60,59	61,69	61,76	62,80	62,82
10	-2	-1	-1	0	0	-1	10,51	10,41	10,34	10,29	10,28	60,89	61,97	62,03	63,07	63,08
11	-2	-1	0	0	0	0	11,35	11,25	11,19	11,15	11,13	61,22	62,29	63,35	63,38	63,39

*Cálculo do Reforço Sonoro (Excel)*

	L_soma (dB)									Atraso (ms)**				
Fila/Lugar	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	4	3	2	1	0
1	59,64	60,53	61,51	62,13	62,54	62,13	61,51	60,53	59,64	-9,36	-9,64	-9,88	-10,05	-10,11
2	58,94	59,74	60,90	61,60	62,21	61,60	60,90	59,74	58,94	-7,85	-7,99	-8,11	-8,19	-8,21
3	58,57	59,39	60,80	61,61	62,36	61,61	60,80	59,39	58,57	-6,59	-6,65	-6,70	-6,73	-6,74
4	58,64	59,54	61,16	62,06	62,10	62,06	61,16	59,54	58,64	-5,57	-5,59	-5,60	-5,61	-5,61
5	57,70	58,56	60,19	61,08	61,11	61,08	60,19	58,56	57,70	-4,76	-4,75	-4,75	-4,74	-4,74
6	59,76	60,77	61,76	62,73	62,76	62,73	61,76	60,77	59,76	-4,11	-4,09	-4,08	-4,07	-4,07
7	59,77	60,78	61,78	62,76	62,78	62,76	61,78	60,78	59,77	-3,59	-3,56	-3,55	-3,54	-3,54
8	59,86	61,79	61,87	62,86	62,87	62,86	61,87	61,79	59,86	-3,16	-3,14	-3,12	-3,11	-3,11
9	60,92	61,96	62,03	63,02	63,03	63,02	62,03	61,96	60,92	-2,81	-2,79	-2,77	-2,76	-2,76
10	61,15	62,18	62,24	63,24	63,25	63,24	62,24	62,18	61,15	-2,52	-2,50	-2,48	-2,47	-2,47
11	61,43	62,46	63,48	63,51	63,52	63,51	63,48	62,46	61,43	-2,27	-2,25	-2,23	-2,23	-2,22

\*\*entre som direto produzido por  $L_{p(o)}$  e  $L_{p(a)}$  com atraso no altifalante de 5 ms



# Referências

- [1] A.P.Oliveira de Carvalho. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. 8.12 edição, 2016.
- [2] F. Alton Everest. *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill, quarta edição, 2001.
- [3] Lawrence E. Kinsler. *Fundamentals of acoustics*. Wiley, 1982.
- [4] F. Alton Everest. *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill, terceira edição, 1994.
- [5] URL: <https://uvicaudio.wordpress.com/2014/10/31/effects-based-on-delay-2/> [último acesso em 2017/06/23].
- [6] Mónica Pinto. Caracterização acústica de grandes auditórios, 2012.
- [7] URL: <http://www.explicatorium.com/cfq-8/propriedades-do-som.html> [último acesso em 2017/06/23].
- [8] URL: <http://brasilescola.uol.com.br/fisica/difracao-ondas.htm> [último acesso em 2017/06/23].
- [9] URL: <https://pt.pinterest.com/jk2126/qrd-skyline-helmholtz/> [último acesso em 2017/06/23].
- [10] URL: <https://www.caddetails.com/Main/Company/ViewProduct?productID=4301&companyID=3463> [último acesso em 2017/06/23].
- [11] URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helmholtz\\_resonator.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helmholtz_resonator.jpg) [último acesso em 2017/06/23].
- [12] Glen M. Ballou. *Handbook for Sound Engineers*. Focal Press, terceira edição, 2002.
- [13] Ricardo Nepomuceno Pereira. Caracterização acústica de salas, 2010.
- [14] Lothar Cremer. *Law of first wave front*. Journal of the Audio Engineering Society.
- [15] URL: <https://www.vocal.com/dereverberation/critical-distance/> [último acesso em 2017/06/23].
- [16] URL: <http://melhoracustica.com.br/2014/02/25/app-tempo-de-reverberacao/> [último acesso em 2017/06/23].
- [17] Joseph J.Smaldino Carl C.Crandell, Carol Flexer. *Sound Field Amplification*. Segunda edição, 2005.
- [18] Diogo Mateus. Acústica de edifícios e controlo de ruído. Relatório técnico, 2008.

## REFERÊNCIAS

- [19] Estudo da inteligibilidade das salas de aula médias e grandes da FEUP. Porto, Novembro de 2005. Trabalho desenvolvido pelo grupo SOAP e cedido pelo Professor Diamantino Freitas.
- [20] Iara Batista da Cunha. A influência dos sistemas de reforço sonoro na qualidade acústica de igrejas católicas, 2014.
- [21] Miguel Romá Romero Basilio Pueo Ortega. *Electroacústica: Altavoces y Micrófonos*. Pearson Educación, 2003.
- [22] SM58 Cardioid Dynamic Microphone Product specifications. URL: [http://cdn.shure.com/specification\\_sheet/upload/82/sm58-specification-sheet-english.pdf](http://cdn.shure.com/specification_sheet/upload/82/sm58-specification-sheet-english.pdf) [último acesso em 2017/06/23].
- [23] John Eargle. *JBL professional's sound system design reference manual*, 1999.
- [24] Regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios aprovado pelo decreto-lei n.º 96/2008. URL: <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/2008/06/11000/0335903372.pdf> [último acesso em 2017/06/23].
- [25] Catherine Guigou-Carter Birgit Rasmussen. A pilot study on acoustic regulations for schools- comparison between selected countries in europe. Inter-noise 2016. URL: <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/001046.pdf> [último acesso em 2017/06/23].
- [26] ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1. Acoustical Society of America.
- [27] Carlos Miguel Silva. O tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra, Julho 2013. Universidade do Porto.
- [28] Inteligibilidade nas salas de aula da FEUP. Salas médias/grandes. 18 de Novembro de 2005. Trabalho desenvolvido pelo grupo SOAP e cedido pelo Professor Diamantino Freitas.
- [29] Emissor Brüel & Kjær 4224. URL: <https://www.bksv.com/media/doc/bp0066.pdf> [último acesso em 2017/06/27].
- [30] Sonómetro Brüel & Kjær 2260. URL: <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf> [último acesso em 2017/06/27].
- [31] Microfone Brüel & Kjær 4190. URL: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2211.ashx> [último acesso em 2017/06/27].
- [32] Microfone Brüel & Kjær 4135. URL: <https://www.bksv.com/media/doc/Bp0100.pdf> [último acesso em 2017/06/27].
- [33] Fonte de alimentação Brüel & Kjær 2804. URL: <https://www.bksv.com/media/doc/bp0218.pdf> [último acesso em 2017/06/27].
- [34] Pré-amplificador SPL ProMike. URL: [https://spl.info/fileadmin/user\\_upload/pdf/BDA-Archiv/PROMIKE\\_BA\\_E.pdf](https://spl.info/fileadmin/user_upload/pdf/BDA-Archiv/PROMIKE_BA_E.pdf) [último acesso em 2017/06/27].
- [35] Placa de interface de som Edirol UA-101. URL: <https://www.roland.com/uk/products/ua-101/specifications/> [último acesso em 2017/06/27].

- [36] Yamaha HS 80M. URL: [http://download.yamaha.com/api/asset/file?language=en&site=countrysite-master.prod.wsys.yamaha.com&asset\\_id=7262](http://download.yamaha.com/api/asset/file?language=en&site=countrysite-master.prod.wsys.yamaha.com&asset_id=7262) [último acesso em 2017/06/27].
- [37] Calibrador Brüel & Kjær 4231. URL: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1311.ashx> [último acesso em 2017/06/27].
- [38] AcoustiCone® 61BA. URL: <http://www.bruel-ac.com/eng/engcone.htm> [último acesso em 2017/06/25].
- [39] logacústica. URL: <https://tinyurl.com/yd3n7u6d> [último acesso em 2017/06/23].
- [40] Exercício constante dos materiais do curso de formação contínua Introdução à engenharia acústica, Diamantino Freitas. 2008.